ليون غولوب

جاي ميرون باساتشوف

الشمس



ترجمة: محمد فتحي خضر

ليون غولوب
جاي ميرون باساتشوف

الشمس

ترجمة
محمد فتحي خضر

مراجعة
طارق راشد عليان

QB529 .G65125 2021

Golub, Leon

الشمس / تأليف ليون غولوب، جاي ميرون باساتشوف؛ ترجمة محمد فتحي خضر ؛ مراجعة طارق راشد عليان.- ط. 1.- أبوظبي : دائرة الثقافة والسياحة، كلمة، 2021.

ترجمة كتاب: The Sun

تدمك: 978-9948-33-152-0

1- الشمس. 2- علم الفلك. أ- Pasachoff , Jay M. ب- خضر، محمد فتحي. ج- عليان، طارق راشد. د- العنوان.

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الإنجليزي:

Leon Golub and Jay M. Pasachoff

The Sun

First published 2017 by Reaktion Books Ltd in association with

The Science Museum, Exhibition Road, London SW7 2DD, UK

www.sciencemuseum.org.uk

صدر بموافقة مكتب تنظيم الإعلام- وزارة الثقافة والشباب- رقم الطلب -01 -03 -MC
. 4805084

طبع في المتحدة للطباعة والنشر- أبوظبي- 80022220





الشمس

المحتويات

المقدمة ٧

الفصل الأول: البُقَع الشمسية ١٣

الفصل الثاني: إلقاء نظرة داخل الشمس ٣٧

الفصل الثالث: نبضة شمسية ٥٧

الفصل الرابع: الطيف وأسراره ٧٩

الفصل الخامس: الغِلاف اللوني والشُّوَاظ الشمسي ١٠٩

الفصل السادس: الإكليل الشمسي المرئي ١٣١

الفصل السابع: الإكليل الشمسي غير المرئي: نقاشٌ يدور في أغلبه حول الفوتونات ١٥٧

الفصل الثامن: عواصف من الشمس: نقاشٌ يدور في أغلبه حول الجُسيمات والمجالات ١٨٥

الخاتمة: الغلاف الشمسي ٢١٧

الملحق 1: الرصد الآمِن للشمس ٢٢٥

الملحق 2: رَصْدُ الشمس بالنسبة للهُواة ٢٣٣

الملحق 3: رَصْدُ الإكليل وقتَ الكسوف الشمسي ٢٣٧

الملحق 4: رَصْدُ الشمس من الفضاء ٢٤٧

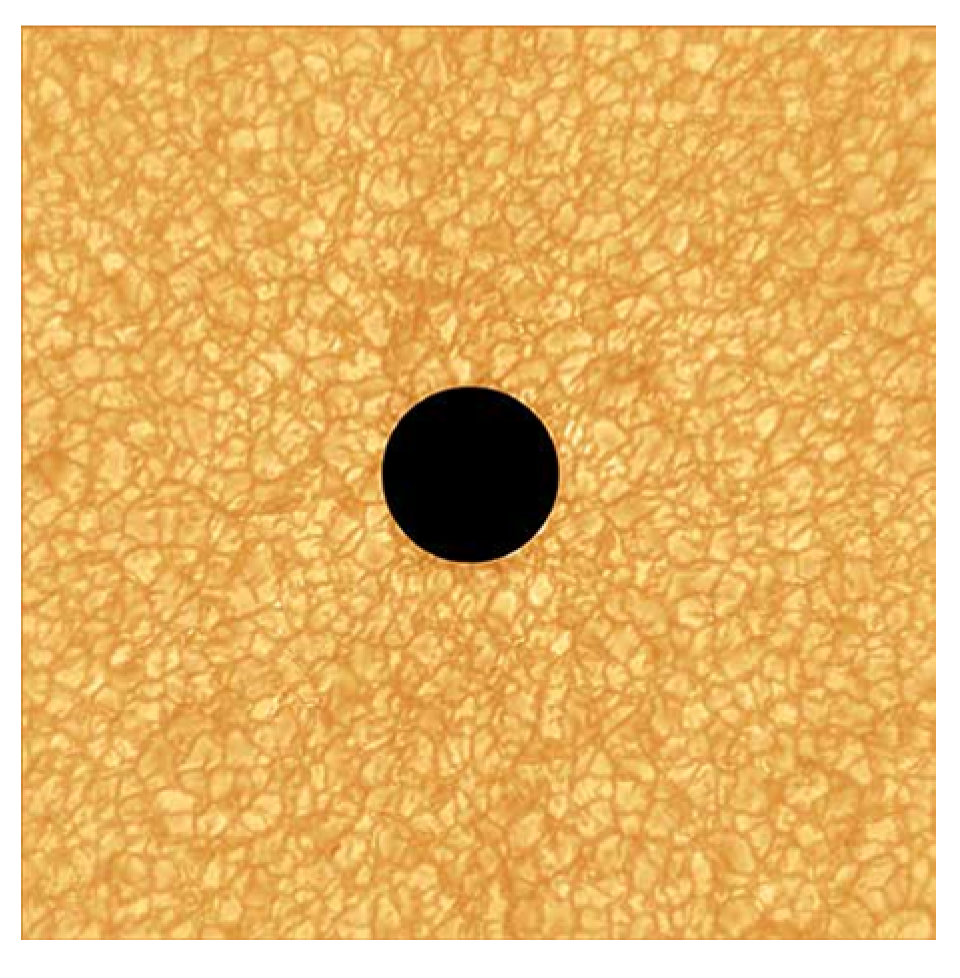
الحواشي ٢٥٧

مزيد من القراءة ٢٦٥

شكر وتقدير ٢٧١

مصادر الصور ٢٧٣

الفهرس ٢٧٧



1- تَظهر الصورة الظِّلِّيَّة لكوكب عُطارِد أمامَ الحُبَيْبات الشمسية في هذه الصورة المأخوذة خلالَ عبورِ عُطارِد أمام قرص الشمس في التاسع من مايو 2016. الحُبَيْبةُ الشمسيةُ هي بِنْيةٌ تُقارِب المملكةَ المتحدة حجماً، وتَظهرُ خلال النهار على سطح الشمس، المعروفِ باسم الغِلافِ الضوئي الشمسي. وتَنتُج هذه البِنْيةُ عن الحَمْل الحراري، وهو تأثيرٌ مُشابِه للغَلَيان. التُقِطَت هذه الصورةُ بواسطةِ التلسكوب الشمسي الجديد البالغ قُطر مرآته 1.6 متر، بالاستعانةِ بالبصريات التكيُّفية، في مرصدِ بيغ بير الشمسيّ في كاليفورنيا على يدِ أحدِ مُؤلِّفَي الكتاب (جاي ميرون باساتشوف) وزملائه. البِنْيةُ الظاهرية الصغرى المتاخِمة لقُرصِ عُطارِد هي صنيعةُ البصرياتِ التكيُّفية التي تجعل التفاصيلَ بهذه الدرجةِ من الوضوح.

المقدمة

لا تَخْفى علـى أحدٍ أهميةُ الشمس للحياة علـى الأرض، وأنَّ لها تأثيراً كبيراً على بيئتنا؛ إذ نرى تأثيراتِ الكمياتِ المفْرِطة من ضوء الشمس على الأرض، من ارتفاع درجة الحرارة قُربَ خط الاستواء حين تكونُ الشمس في كَبِد السماء، إلى المناطق المعتدلة الحرارة التي يعيش فيها جُلُّ سكَّانِ العالَم، إلى الأراضي الجليدية تحت شمس منتصف الليل (في القطبَين الشمالي والجنوبي). ونشعر كلَّ يومٍ بتأثيرِ حضورِ الشمس وغيابها؛ ونعني بذلك حرفياً الاختلافَ بين النهار والليل.

لكن التوغُّل إلى ما وراء هذا الإدراكِ الأساسي يتطلَّب فهماً علمياً. فالشمسُ ليستْ في حجمِ القمر ولا تَبعدُ عنَّا قدْرَ بُعده عنَّا، بصرفِ النظر عمَّا يَتراءى لنا في الظاهر. وهي لا تدورُ حول الأرض، على الرغم من أنها تَبدو كذلك. ويتطلب فهمُ ماهية الشمس - ما تتكوَّن منه، وسبب سُطوعها الشديد، وعُمرها، وكَمْ ستَظَلُّ باقيةً - الكثيرَ من التفكير والتجريب. ويرمي هذا الكتاب إلـى البدْءِ فـي اكتسابِ بعض هذا الفَهْم، واستكشافِ ما نعرفه عن الشمس وكيف حصَلْنا على هذه المعرفة.

ثَمةَ طرائق عديدة لتناوُل هذا الموضوع. واخترنا في هذا الكتاب طريقـةً غيرَ معتادةٍ بعض الشـيء نأمل أن تُكملَ الطرائـق الأخـرى الأكثرَ تقليديـةً. وانتقينـا بحرصٍ بعضاً مـن أهـم صـور الشمـس وأكثرها لَفْتاً للانتباه، بعضُها يعود إلى بداياتِ القرن السابع عشر، وبعضُها نراه يومياً بصورةٍ شبهِ فورية، واستخدَمْنا كلَّ صورةٍ منها بوصفها نقطة تركيز لنقاشٍ يتناولُ الظاهرةَ الشمسية الواضحة في الصورة. ما الذي ننظـر إليه؟ ولماذا يهمُّ الأمرُ من الأسـاس؟ وما المهم بشأنِ هذا الشيء؟ وما الذي نَعرفه عنه، وكيف حصَلْنا على هذه المعرفة؟ وما الشيء الذي لم نزل نَجهَله؟ قد يبدو مستغرباً بعضَ الشيء أن تبدأ مُناقَشةٌ تتناولُ باطنَ الشمس بتقريرٍ عن الزلازل في الهند، بيْدَ أن هذا الترابط في الطبيعة يُعَد في حقيقةِ الأمر سِمةً محورية للبحث العلمي؛ فلا توجد فواصل تامةٌ بين الأشياء في الطبيعة، فكلُّها نظامٌ واحد.

وتتراوح الصورُ التي اخترناها ما بين صورٍ لباطن الشمس (كيف يُمكِن هذا؟)، إلى صورٍ لسطح الشمس، حيث تُرى البُقَعُ الشمسية المألوفة، إلى الإكليل الشمسي والرياح الشمسية غير المرئية (لأعْيُننا المحدودة الرؤية)، إلى الغلاف الشمسي؛ ذلك الحيز الذي تهيمن عليه الطاقة والكتلة المتدفِّقة من الشمس إلى الفضاء. وتظهَر المعاني العديدةُ لكلمةِ «صورة» بشكلٍ واضح هنا؛ بدءاً

من المعنى الحرفي للصورةِ، ومروراً بالتصوُّرِ، ووصولاً إلى تكوينِ مُخطّطٍ ذهني للفَهْم. بل إننا نُورِد صوراً طيفية أيضاً - وهو أمرٌ نادر في مناقَشةٍ كهذه - ونبيّن كيف أن تأويلَ هذا النوعِ الأكثرِ تعميماً من الصور (بمَعانيه المتعددة) له دورٌ حيوي في قُدْرتنا على رؤيةِ ما يحدث.

لقد كان الفَهْم المتنامي لمدى انتشار النشاط، والتقلب الديناميكي في جميع أنحاءِ الفضاء المعروف، أحدَ الموضوعات الرئيسة في تاريخِ الفيزياءِ الشمسية، والفيزياءِ الفلكية عموماً. إن الكون أكثرُ تقلُّباً وديناميكيةً وتفجُّراً بكثير ممَّا أدركناه منذ بضعةِ أجيالٍ قليلة لا غير؛ فهناك تدفقات أشعةِ غاما، والتيارات المنبعثة من الأجرام المضغوطة، والانفجارات الصادرة عن الشمس والنجوم الأخرى، والموجات الصدمية المغناطيسية الممتدّة من المُستعِرات العظمى وغيرها من الأجرام، وما هذا إلا غَيْضٌ من فَيْض. وفي حالاتٍ عديدة، تكون المجالاتُ المغناطيسية جزءاً أساسياً من النشاط أو التأثيرات التي يُحدِثها النشاط. وكما قال أحدُ زملائنا (ثَمةَ جدَلٌ حول هُوِيَّة مَن قال هذه العبارة أولاً): «تَلعبُ المجالاتُ المغناطيسية في الفيزياءِ الفلكية الدور نفسه الذي يَلعبُه النشاط الجنسي في التحليلِ النفسي».

من الممكنِ أن يكونَ رصْدُ الشمسِ مصدرَ خطرٍ على بصرِ الشخص إذا لم تُتَّخَذ الاحتياطاتُ الملائِمة، ويجب ألَّا تنظرَ مباشَرةً إلى الشمسِ عبر تلسكوبٍ دونَ استخدامِ فلاترِ رصدٍ شمسية خاصة. وقد أوردنا في الملحَق رقم 1 مناقَشةً حول «الرصد الآمن للشمس» بهدفِ إرشادِ الأشخاص الذين يَودُّون الانخراطَ في رصْدِ الشمس. وأدرَجْنا أيضاً مُلحَقاً عن رصْدِ الشمس وقتَ الكسوف، ورصدها كذلك من الفضاء، وهو أمرُ قد يبدو غير عملي بالنسبة للسواد الأعظم من الناس.

أمَّا بالنسبة لمن يرغبون في إجراء المزيد من الاستكشاف، فقد أوردنا في نهاية الكتاب بعضَ مصادر الاطلاع المقترَحة. ثمة الكثيرُ من الكتاباتِ المبسَّطة عن الموضوعات المختلفة التي نتناولها في هذا الكتاب صدرتْ حديثاً، وقد أوردناها هنا في مصادرِ الاطلاع الإضافية المقترَحة ذاتِ الصلة (تحت عنوان «مزيد من القراءة»). أمَّا أولئك الذين يَودُّون الحصولَ على براهينَ تُثبِت التأكيداتِ التي ذكَرْناها في الكتاب، فقد أوردنا لهم أيضاً قائمةً مُختصَرة ببعضِ المقالات العلمية الأكثر تخصُّصاً.

وهناك موقعٌ إلكتروني ننشر فيه التحديثاتِ والتصحيحاتِ المتعلِّقة بمادة هذا الكتاب، على الرابط التالي:

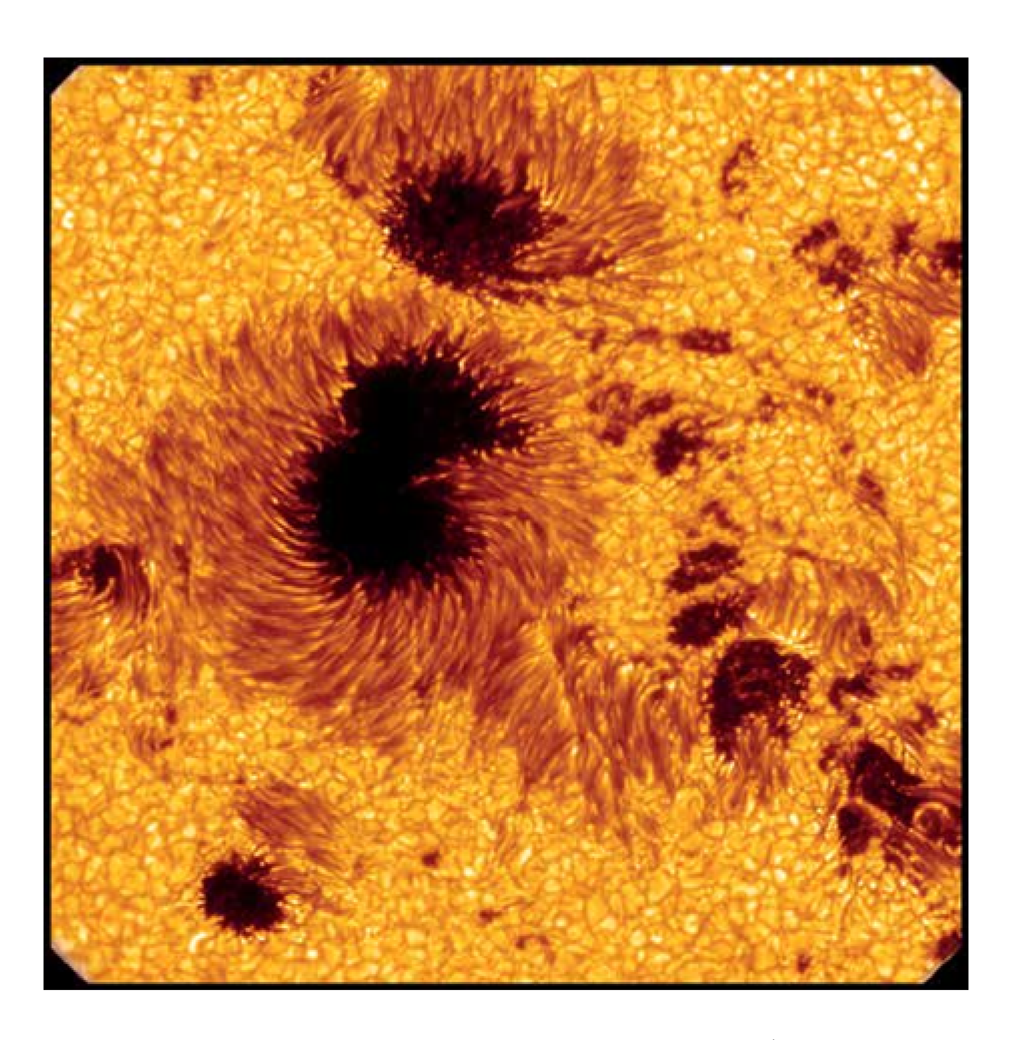
http://web.williams.edu/Astronomy/sciencemuseumlondon

وهو متاحٌ أيضاً عبر الرابط التالي:

http://solarcorona.com

ونقدّم أيضاً عدداً متنوعاً من الروابط لمواقعَ إلكترونيةٍ تتناول علومَ الشمس، ورصْدَ الكسوف، وغيرَ ذلك من الأمور التي ربما تهمُّ قراء هذا الكتاب. ونخصُّ بالذكر مَقالاً يضمُّ هذه الروابط:

Jay M. Pasachoff, 'Resource Letter sp- 1 on Solar Physics', *American Journal of Physics*, lxxviii (September 2010), pp. 890- 901.



2- صورةٌ عاليةُ الدقة لمجموعةٍ كبيرة من البُقَع الشمسية. تُظهِر الصورة ظلالَ البُقَع الشمسية، وكل ظلٍّ منها مُحاطٌ بحلقةٍ أسطعَ من الخيوط الرفيعة، تنبعثُ بصورةٍ قُطْرية من الظل، وتُسمى

هذه المنطقةَ شبهَ الظل، وكلٌّ هذا مُحاطٌ بغِلافٍ ضوئــي مُضطرِب، وهو النمطُ الحُبَيْبي في الجزءِ المحيط من الصورة، ويمثِّل الحُبَيْباتِ الطبيعيةَ المنتشرة التي تُـرى على سطحِ الشمس كُلِّه.

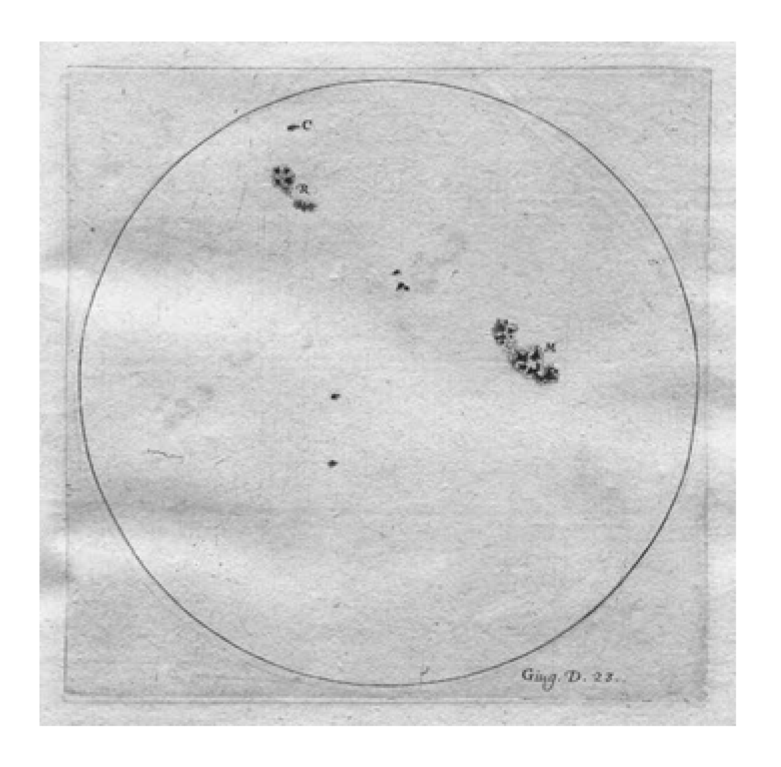
الفصل الأول
البُقَع الشمسية

عادةً ما تكون الشمس شديدةَ السطوع إلى درجةٍ يستحيل معها النظرُ إليها مباشَرةً من دون الإضرار بالعينَيْن، لكن عند تقليلِ سطوعها إلى مستوى آمِن بفعلِ سَدِيم الغروب أو السُّحُب الرقيقة، أو إذا استُخدِمَ مرشِّحٌ داكنٌ خاص، نصيرُ قادرين على رؤيةِ قُرص الضوء المتوهِّج المستدير الضارب إلى الصُّفرة. وبنظرةٍ سريعة تبدو الشمسُ خاليةً تماماً من أي علامات، لكن أحياناً يستطيع بعضُ الأشخاص - من أصحاب البصـر الحاد - تبيُّنَ نقطةٍ صغيرة سوداء أو نقطتَيْن تلطِّخان القُرص. ومع التدريب، يكون بالإمكان رؤيةُ مجموعاتٍ من هذه النقاط أحياناً. ومع الرصد المتكرر، يوماً بعد يوم، يتبيَّن أن هذه النقاط تتحرَّك عبر القُرْص، أو تنمو في الحجم، أو تَذْوي من يومٍ إلى آخَر. والاسم البديهي الذي يُطلَق على هذه المعالم هو البُقَع الشمسية (الشكل 2).[1]

وتشير الدراساتُ الأثرية الحديثة، وبالأساس تلك التي تناوَلتِ النقوشَ الموجودة على العِظَام القديمة، إلى أن عملياتِ رصْدِ الشمس كانت ذاتَ أهميةٍ في الصين منذ زمنٍ بعيد يعود إلى عصرِ أسرةِ شانغ الحاكمة (نحــو 1500- 1050 ق.م). ومــن المعروف أن التسجيلَ المنهجي للبُقَع الشمسية قد بدأ خلال عصرِ أسرةِ هان الحاكمة (بدايةً من 206 ق.م)، لكن سبب هذا الاهتمامِ المبكر ليس معروفاً، وعددُ السجلات أقلُّ كثيراً عن العدد المتوقَّع لو أخذنا في الحسبان أن البُقَعُ الشمسية كانت محورَ الاهتمام الرئيس. لكن كثيراً من الأوصاف واضحةٌ وتُمكِّننا من معرفةِ أن الشمس كانت بها بُقَعٌ آنذاك، كما هو الحال الآن، ومن ثمَّ نعرف أن البُقَعَ الشمسية سِمةٌ طبيعية ودائمةٌ لقُرْص الشمس المرئي.

وفي الغرب، لا يبدو أنَّ ثَمةَ سجلاتٍ كثيرةً تُوثِّق البُقَعَ الشمسية. ومن المحتمَل أن يكون الاعتقادُ القديم بأن الشمسَ مثاليةٌ وعديمةُ البُقَع قد ثَبَّط أي محاولةٍ لتسجيل التشوُّهات. لكن في أوائل القرن السابع عشر غَيَّر غاليليو Galileo هذه الفكرة عندما بدأ في استخدامِ التلسكوب (المقراب) المُختَرَع حديثاً كي يَرصدَ الأجرامَ السماوية، ومن بينها الشمس. وقد أجرى مشاهَداتٍ دقيقةً ومتكررة (ربما لعبتْ دوراً في إصابته بالعَمى)، وأنتَجَ رسوماتٍ للبُقَع الشمسية وهي تنمو وتَذْوي وتنتقل عبر السطح الخارجي للشمس. وانطلاقاً من الدراسة الدقيقة لتتابُعات الرسومات هذه ذهب غاليليو، بناءً على قياساتِ المسار الذي تتَّبِعُه البُقَعُ الشمسية حول القُرص، إلى أن هذه البُقَعَ

موجودةٌ على سطح الشمس، ومن ثَم فإنها معالم حقيقيةٌ للشمس. وبعد ذلك، نشَبَ جدَلٌ مُحتدِم حول ما إذا كانت هذه اللطخاتُ موجودةً بالفعل على سطح الشمس، أم أنها تمرُّ من أمام الشمس، أم أنها نوعٌ من السُّحب الموجودة بين كوكبنا وبين الشمس.



3- كما سنرى، كان غاليليو وعددٌ من مُنافِسِيه أولَ مَن شاهَدوا وسجَّلوا تفاصيلَ البُقَعِ الشمسية. هذا الرسمُ مأخوذٌ من كتابٍ ألَّفَه غاليليو عن البُقَع الشمسية في عام 1613، ويبيِّن سلسلةً يومية من البُقَع الشمسية التي تُظهِر دورانَ الشمس.

بعد وقتٍ قصير من هذه المشاهَدات المبدئية بالتلسكوب حدَثَ أمرٌ عجيب؛ إذ اختفَتِ البُقَعُ الشمسية. وعلى مدار عقود، بين عامَيْ 1645 و1715، وبكثير من التزامن مع فترةِ حُكمِ لويس الرابع عشر (المُكنَّى بـ «الملك الشمس») في فرنسا، صارت الشمسُ شبهَ خاليةٍ من البُقَع. وكان غيابُ البُقَع أمراً معروفاً جيداً في ذلك الوقت؛ إذ صرَّحَ الراصدُ الدقيق يوهانس هيفليوس Johannes Hevelius في عام 1668 قائلاً: «على مدار سنواتٍ عديدةٍ الآن، ربما عشرِ سنواتٍ أو أكثر، أنا واثقٌ من أنه لم يُرصَدْ أيُّ شيءٍ ذي أهميةٍ كبيرة (فيما خلا بعض البُقَع الصغيرة التي لا يؤبَه لها)». تزامنت فترةُ غيابِ البُقَع أيضاً، على نحوٍ تقريبي، مع الجزء الأسوأ من فترةِ طقسٍ باردٍ ممتدة في أوروبا عُرفت باسم «العصر الجليدي الصغير»؛ مما أدَّى إلى التكهُّن بأن غيابَ البُقَع تسبَّبَ في برودةِ الأرض بدرجةٍ ما. لكن التوقيتَ لا يُعضِّد هذه الفرضيةَ؛ نظراً إلى أن البردَ بدأ فيما يبدو في عام 1550 تقريباً، واستمرَّ حتى عام 1850، ولا تقدِّم الأدلةُ غيرُ المباشرة، المستقاةُ من سجلاتِ عملياتِ التجمُّد وتساقُط الثلوج واللُّب الجليدي، كثيراً من الدعم للفكرة القائلة بأن باقي العالَم شهِدَ برودةً مماثِلةً لتلك التي شهِدَتْها قارةُ أوروبا؛ ومن ثَم فإن قوةَ الارتباط بين البُقَع الشمسية والمناخ ما برحتْ غيرَ مؤكَّدة، بل وتمثِّل إشكاليةً أيضاً في أفضل الأحوال.

لكن بعد ذلك، في القرن الثامن عشر، عاوَدَتِ البُقَعُ الشمسية الظهورَ، وما برحتْ تظهرُ بصورةٍ دورية على الشمس منذ ذلك الحين. وهي تظهرُ وتختفي بصورةٍ دورية؛ فهناك سنواتٌ تَكونُ فيها الشمسُ مغطَّاةً بأعداد كبيرة من البُقَع، وسنواتٌ أخرى تكادُ لا تَظهرُ فيها بُقَعٌ. ويستغرق التغيُّرُ من حالةِ «دورة الشمس الدُّنيا» ذاتِ النشاط المنخفض، إلى حالةِ «الذُّروة الشمسية» ذاتِ النشاط المرتفع بِضْعَ سنوات، ويبلغ إجمالي الوقتُ بين كل فترةِ ذُروةٍ والتي تَلِيها نحو أحد عشر عاماً، مع تفاوُتٍ قَدْرُه بِضعُ سنواتٍ بين كلِّ دورةٍ وأخرى. ومن المثير للدهشة أن يمرَّ نَجْمٌ بمِثْلِ هذه التغيُّرات الواضحة في مثل هذا الوقت القصير، خاصةً عندما نضَعُ في الاعتبارِ أن الشمسَ تتَّسِم بالاستقرار في غير ذلك من الجوانب، وتحتاجُ إلى ملايينَ كثيرةٍ من السنين كي تَحدثَ فيها أيُّ تغيُّراتٍ تُذكر.

تُعَدُّ دورةُ البُقَع الشمسية أحدَ الألغاز الكبيرة المتعلقة بالشمس، التي نجد صعوبةً كبيرة في فَهْمها. وفي الوقت الحالي سنطرحُ سؤالاً أبسطَ: ما هذه البُقَع؟ لقد تطلَّبتْ إجابةُ هذا السؤال بِضعَ مئاتٍ من السنوات لاكتشافها، وتبيَّنَ أنها مفاجِئة.

وُلِد السير وليام هيرشل William Herschel باسم فيلهلم فريدريش هيرشل Wilhelm Friedrich Herschel، في هانوفر عامَ 1738، وكان ابناً لعازفِ مزمارٍ في فرقة هانوفر الموسيقية العسكرية (وفي وقتٍ لاحق صار هو نفْسُه موسيقاراً من الطراز الأول). وفي عام 1757، وهو في سنِّ التاسعة عشرة، أُرسِل إلى إنجلترا، حيث استمرتْ أنشطتُه الموسيقية، ولم يتحوَّلْ هو وشقيقتُه كارولين Caroline (التي أقنعَها بالانضمام إليه في إنجلترا بوصفها مُغنِّية في فرقته الموسيقية) على نحوٍ نَشِطٍ إلى الدراسات الفلكية، إلا في العَقْد الثامن من القرن الثامن عشر. وبمساعَدةِ كارولين، اكتشَفَ وليام كوكبَ أورانوس في عام 1781، وهو أولُ كوكبٍ جديد يُكتشَف منذ أكثر من ألفَيْ عام، وأطلق عليه اسم «جورجيوم سيدوس» Georgium Sidus، - أيْ الكوكب الجورجي - تيمُّناً بالملك جورج الثالث George III، وحصل كِلاهما نظيرَ هذا الاكتشافِ على مَعاشٍ مدى الحياة (مِقدارُه 200 جنيه إسترليني لوليام، و50 جنيهاً إسترلينياً لكارولين)، وهو ما مكَّنَهما من تكريسِ نفسَيْهما بالكامل لعِلم الفلك. وفي إحدى دراساته الشمسية، حاوَلَ وليام ربْطَ سعرِ القمح في لندن بالتغيُّرات في أعدادِ البُقَع الشمسية، واكتشف أيضاً أن الشمسَ تُطلِقُ كَمِّياتٍ ضخمةً من الإشعاع فيما وراء الطرف الأحمر للطيف المرئي (وهو ما نسميه الآن «الأشعة تحت الحمراء»).[2] واقترح أن البُقَع الشمسية هي فَجواتٌ في الشمس، يُمكِن للمَرْءِ أن يرى منها باطن الشمس المظلم، على نحوٍ يُشبِه بُؤْبؤَ العين. وجاء هذا في أعقابِ اكتشافٍ حقَّقَه عالِمُ الفلك الإسكتلندي ألكسندر ويلسون Alexander Wilson، رئيسُ لجنةِ علم الفلك العملي في جامعة غلاسكو، في عام 1760، والذي لاحَظَ أن البُقَع الداكنة تبدو منخفضةً قليلاً عن السطح المرئي للشمس عند النظر إليها قُرْبَ حافةِ قُرص الشمس. استغرق الأمر سنوات عديدة قبل أن يتطوَّرَ مجالُ الديناميكا الحرارية بما يكفي ليُبيِّنَ أن نظريةَ هيرشل لم يكُنْ لها أساسٌ متين، وظلت الطبيعةُ الحقيقية للبُقَع الشمسية لغزاً حتى القرن العشرين.

العصر الحديث لدراسات البُقَع الشمسية

قُطِعَت خطوةٌ من أهم الخطوات في سبيلِ فَهْم البُقَع الشمسية من جانبِ العالِم الأمريكي المجتهد جورج إليري هيل George Ellery Hale فـي نهاية القرن التاسع عشر وأوائل القـرن العشرين. وُلِد هيل فـي شيكاغو في عام 1868، لعائلةٍ تعملُ في مجال الهندسة (كان والِدُه يعمل في صناعة المَصاعِد، ومن بينها المصعدُ الموجود في برج إيفل)، ودرسَ في معهد ماساتشوستس للتقنية. وفي أثناء دراسته هناك، ابتكَرَ في عام 1889 نوعاً جديداً من أدوات رَصْد الشمس، يُسمَّى مرسامَ الطيف الشمسي، وما زال يُعَدُّ حتى يومِنا هذا إحدى الأدوات الرئيسة لرَصْد الشمس. وفي الواقع، استُخدِمَت نسخةٌ من هذه الأداة لإنتاجِ صورةِ البُقَع الشمسية الموضَّحة في الشكل رقم 4. وبعد بِضعِ سنوات أشرَفَ هيل، وهو في شيكاغو، على بناءِ مرصد يركيس Yerkes Observatory، الذي تضمَّنَ أكبرَ تلسكوب انكساري (يَستخدم العدساتِ بدلاً من المرايا) شُيِّدَ على الإطلاق. وبعد ذلك شيَّدَ هيل، بمساعدةٍ من أندرو كارنيغـي Andrew Carnegie، مرصدَ ماونت ويلسون الشمسي في كاليفورنيا، مُشيراً إلـى أن «الهدفَ الأساسي للمرصدِ الشمسي هـو استخدامُ الأدوات والطرائـق البحثية الجديـدة فـي دراسةِ العناصـر الفيزيائية لمُعضِلة تطوُّر النجوم». وفي سبيلِ تحقيقِ هذه الغاية، شيَّدَ هيل مختبراتٍ بحثيةً داخل مراصده لإجراء تجارِبَ ساعدتْ في تفسيرِ المشاهَدات الفلكية، وهو المجالُ المعروف الآن باسمِ الفيزياء الفلكية المختبرية.

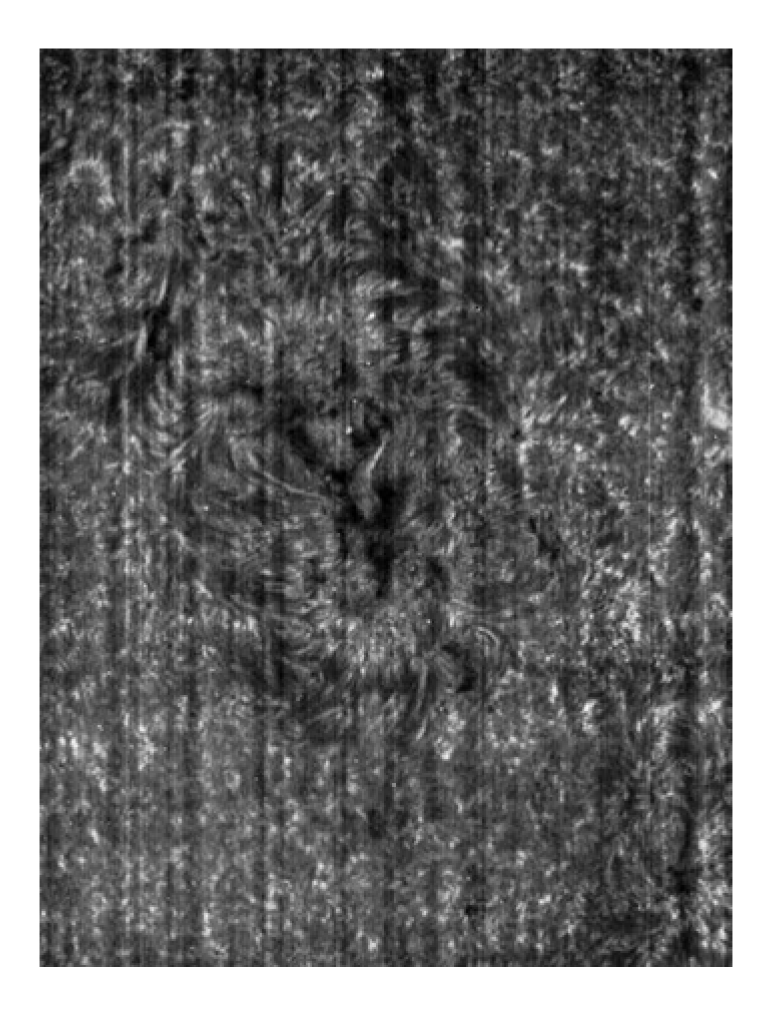


4- صورةٌ مُلتقطة للشمس بواسطةِ مرسامِ الطيف الشمسي في 1 يناير 2013، قُرْبَ ذُروةِ دورةِ النشاط الشمسي. تَستخدم هذه الصورةُ طريقةً مشابِهة لتلك التي استحدَثَها جورج إليري هيل: حُزمة ضيِّقة جداً مُركَّزة على خط الانبعاث القَوِي للهيدروجين عند طولٍ موجيٍّ مِقدارُه 656.3 نانومتر. يَظهر في الصورة عددٌ قليلٌ فقط من بُقع الشمس الصغيرة المتفرقة، وهو ما يشير إلى أن هذه الذُّروةَ كانت ضعيفةً مُقارَنةً بنظيراتها خلال الخمسين عاماً الماضية.

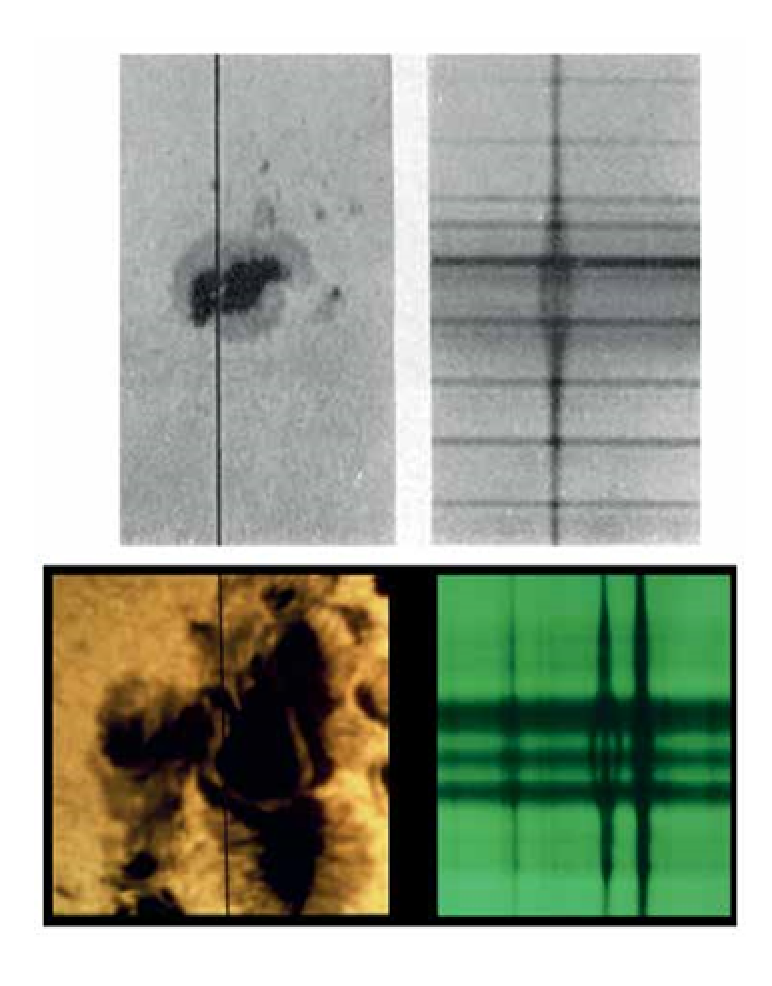
بعد المشارَكة في تطويرِ مرصد ماونت ويلسون، تولّى هيل مهمةَ تخطيطِ مرصدِ بالومار Palomar Observatory، الذي ظلَّ لسنواتٍ عديدة التلسكوبَ الفلكي الأكبرَ في العالَم. لكن هيل فعَلَ ما هو أكبرُ من تشييدِ المراصد؛ فعندما كان أستاذاً شاباً في جامعة شيكاغو أسَّسَ في عام 1895 الجمعيةَ الفلكية الأمريكية American Astronomical Society، وهي المنظَّمةُ المهنية الرائدة في الولايات المتحدة لعلماء الفلك، وأسَّسَ «المجلةَ الفيزيائية الفلكية» Astrophysical Journal، التي كانت ولم تزل واحدةً من كُبرى الدوريات المهنية في العالَم في نشرِ بحوثِ الفيزياء الفلكية. وفي عام 1904، نظمَ هيل مجموعةً علميةً دوليةً صارت تُعرَف لاحقاً باسم الاتحاد الفلكي الدولي International Astronomical Union، الذي يُعَد، كما يُقال، المنظَّمةَ المهنيةَ الكبرى لعلماء الفلك على مستوى العالَم. وفي عام 1907، انضمَّ هيل إلى مجلسِ إدارة معهد ثروب في باسادينا Throop Institute وقادَ الجهودَ التي حوَّلتِ المعهدَ إلى معهد كاليفورنيا للتقنية. وفي عام 1916، قاد هيل عمليةَ تأسيسِ المجلس الوطني للبحوث National Research Council، الذراعِ التنفيذية للأكاديمية الوطنية الأمريكية للعلوم، والذي يُنفِّذ غالبيةَ دراساتها العلمية.[3]

خطرتْ في ذهنِ هيل فكرةُ محاوَلةِ تحديدِ ما إذا كانت البُقَع الشمسية مُمَغْنَطة أم لا. بطبيعة الحال، تشير حقيقةُ قيامِه بالقياس من الأساس إلى أنه اعتقد أن البُقَعَ يُمكِن أن تكون سماتٍ مغناطيسية. كان هيل يعتقد أن المجالاتِ المغناطيسية تُوَلَّد على الأرجح بواسطةِ تياراتٍ كهربية داخل «دوَّامات» محيطة بالبُقَع الشمسية (شكل 5)، على النحو الذي وصفه في العدد الصادر عام 1908 من «المجلة الفيزيائية الفلكية»، لكن يبدو أن وصْفَه يشير إلى أنه عَدَّ البُقَعَ مُشابِهةً للأعاصير الأرضية، إذ قال: «يبدو جلياً، من فحْصِ هذه الصور الفوتوغرافية، أن البُقَعَ الشمسية هي مراكزُ للجذب، تَسحَب نحوَها الهيدروجين من الغِلاف الجوي للشمس».

وأيّاً كانت دوافع هيل، فقد قرَّر تطبيقَ طريقةٍ مكتشَفة حديثاً لقياس المجالات المغناطيسية فقط عن طريق دراسة الضوء المنبعِث من أي جِرْمٍ سماوي بعيد. وفي عام 1896، أعلَنَ العالِمُ الهولندي بيتر زيمان Pieter Zeeman (الحائز جائزة نوبل في الفيزياء بعد ذلك في عام 1902) عن اكتشافِ طريقةٍ لقياس المجالات المغناطيسية داخل الغاز الساخن، عن طريق التحليل الدقيق للضوءِ المنبعِثِ من الغاز. وأثبتَ زيمان أن مستويات الطاقة في ذرات الغاز الباعثة للضوء من شأنها أن تنزاح قليلاً نتيجةَ وجودِ مجالٍ مغناطيسي؛ ومن ثَمَّ تغيِّرُ قليلاً من الطول الموجي للضوء المنبعث. واختتم زيمان ورقتَه البحثية باقتراح أن هذه الطريقةَ ستكون مفيدةً في الفيزياء الفلكية. واستند هيل إلى هذه الفكرة وطبَّقَها على البُقَع الشمسية، وحقَّقَ نجاحاً مدوياً.



5- رأى هيل دوائرَ ودوَّاماتٍ تحيطُ بالبُقَع الشمسية، وهو ما أقنَعَه بأنها ذاتُ سماتٍ مغناطيسية. وبالإشارة إلى البُقْعة المبيَّنة هنا كتب هيل: «إن الحلقات المحدَّدة بوضوحٍ تشير إلى وجودِ عواصفَ أو دوَّاماتٍ إعصارية». لاحظ أن الخطوطَ العمودية في الصورة ليست موجودةً على الشمس، وإنما هي ناتجةٌ عن الطريقة المستخدَمة في إنتاجِ صورِ مرسام الطيف الشمسي.



6 - في الأعلى: تُظهِر الصورةُ القياسَ الذي أقنَعَ هيل بالطبيعة المغناطيسية للبُقَع الشمسية؛ إذ يُلاحَظ النمَطُ الخاص لانشقاقِ الطول الموجي الذي تنبَّأَ به زيمان في الضوء المنبعث من البُقْعة الشمسية. الخطُّ العمودي على اليسار هو شقُّ مرسام الطيف، الذي يمرُّ منه الضوء الوارد من الشمس في طريقِه إلى فيلم التصوير. وتُظهِر الصورةُ على اليمين الطيفَ؛ أيِ الضوءَ الوارد عبر الشقِّ بعد أن انتشَرَ حسب طوله الموجي. وفي الموضع الذي يَقطعُ فيه الشقُّ البُقعةَ الشمسية، تبيِّن الصورةُ على اليمين خطَّ الطيف وهو ينقسم إلى ثلاثةِ مكوناتٍ بواسطة المجال المغناطيسي القوي. الخطوطُ الأفقية ناتجةٌ عن تركيبِ المرشح المستخدَم في إجراء القياسات.

في الأسفل: نسخةٌ حديثة من القياس ذاته، مأخوذةٌ من مرصد مكماث- بيرس الشمسي McMath-Pierce Solar Facility في كيت بيك، ولاية أريزونا.

ما الذي رآه هيل ووجد أنه دليلٌ مُقنِعٌ على وجودِ مجالٍ مغناطيسي قوي؟ يوضِّح الشكل 6 مثالاً على ذلك، وهو مأخوذ من ورقة هيل البحثية التي قدَّمها عام 1919، للتأثير المُسمَّى تأثيرَ زيمان في إحدى البُقَع الشمسية. يركِّز تلسكوبٌ صورةً للشمس على لوحٍ ساطعٍ محفور به شق، ويُوضَع الشقُّ فوق مكانِ سقوطِ البُقْعة الشمسية. يَظهر هذا في النصف الأيسر من الشكل الإيضاحي، إذ يمثِّل الشريطُ العمودي الداكن الشِّقَّ الذي يستطيع بعضُ الضوءِ الوارد المرورَ منه، ويشمل ذلك الضوءَ القادم من البُقعةِ الشمسية الأغمقِ الواقعةِ قُرْبَ مركز الصورة. بعد ذلك يُحَلِّل الضوءُ المار

عبر الشقّ بواسطةِ نشرِ الأطوال الموجية المختلفة في الضوء، باستخدامِ طولٍ موجي مُختار معيَّن يكون حسَّاساً لوجودِ المجال المغناطيسي. والنتيجةُ مبيَّنةٌ في النصف الأيمن من الشكل الإيضاحي، إذ يكون انتشارُ الطول الموجي في الاتجاه من اليسار إلى اليمين. ومن السهل أن نرى عن طريق النظر إلى الضوء أنه يَسلكُ سلوكاً غريباً في منطقة البُقعة الشمسية؛ فنظراً إلى أن المجالَ المغناطيسي يسبِّب انزياحَ مستويات الطاقة في ذرات الغاز الشمسي، فإن الأطوالَ الموجية للضوءِ المنبعِث بواسطة الذرات تَنشطِر إلى مكوناتٍ متعددة، على النحو الذي وصفه زيمان في تجارِبه المعملية تماماً. وهذا الانشطارُ في الطول الموجي، علاوةً على خواصَّ تفصيليةٍ أخرى للضوء (مثل الاستقطابِ عند زوايا الرؤية المختلفة)، يُثْبِتُ أن الضوءَ الوارد من البُقعة يُنتَج في مكانٍ به مجالٌ مغناطيسي قوي، أقوى بآلاف المرات من متوسط المجالِ المغناطيسي للأرض مثلاً. وكتب زيمان نفْسُه تعليقاً على مقالِ هيل قال فيه: «لقد قدَّمَ البروفيسور هيل ما يبدو دليلاً قاطعاً على أن البُقَعَ الشمسيةَ لها مجالاتٌ مغناطيسية قوية، وأنَّ اتجاهَ هذه المجالاتِ يَتعامَدُ بصورةٍ أساسية على سطح الشمس».

وهكذا يتضح أن البُقَعَ الشمسية هي بالفعل أماكنُ يندفعُ فيها مجالٌ مغناطيسي قويٌّ للغاية عبر سطح الشمس. وهذه الحقيقةُ الواحدة هي أساسُ ظاهرةِ البُقَع الشمسية. ونظراً إلى أن غالبيةَ الناس يَجِدون صعوبةً في تخيُّلِ ماهيةِ المجال المغناطيسي، والتأثيراتِ التي يُنتِجها، نحتاجُ إلى الاستطرادِ قليلاً والتحدُّث عن المجالات المغناطيسية.

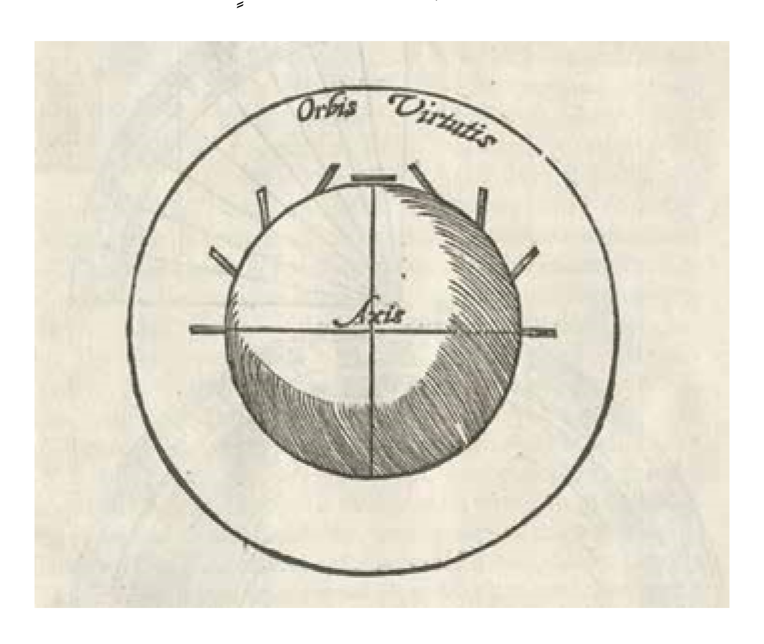
عن المغناطيس

كان العام 1600 عاماً حافلاً بالأحداث في أوروبا؛ إذ بدأ بحرْقِ جوردانو برونو Giordano Bruno على الوَتِد بتهمةِ الهَرْطقة، وانتهى بإنشاءِ شركةِ الهند الشرقية البريطانية، التي صارتْ دعامةً أساسية من دعائمِ الإمبراطورية البريطانية المتوسِّعة. تحوَّلَ المناخُ في أوروبا إلى البرودةِ والرطوبة، وهو ما أدَّى إلى تضاعُفِ أعدادِ الجرذان، وما صاحَبَ ذلك من انتشارٍ للطاعون. ونشَرَ طبيبٌ لندني يُدعى وليام جيلبرت William Gilbert (كانت إليزابيث الأولى واحدةً من مَرْضاه) كتاباً بعنوان «عن المغناطيس» (De Magnete)، ناقَشَ فيه الأجسامَ المغناطيسية، وزعمَ أن الأرضَ نفْسَها مغناطيسٌ عملاق. تُوفِّي جيلبرت في عام 1603، وكان سببُ الوفاة على الأرجح هو تفشِّي الطاعونِ.

بين البحرِ الأسود وبحرِ إيجة والبحرِ المتوسط تقعُ الأناضول، أو آسيا الصغرى - جمهوريةُ تركيا في وقتِنا الحالي - التي شكَّلتْ تقاطُعَ طرقٍ ثقافياً مهماً بين آسيا وأوروبا يعودُ إلى العصرِ الحجري الحديث. وفي الجزء الغربي منها، في إيونية Ionia، أسَّستْ قبيلةٌ يونانية قديمة تُدعى مغنيت Magnetes مدينةً تجارية كبيرة ومهمة تُدعَى مغنيسيا Magnesia. كانتِ المدينةُ تقع على مسيرةِ يومٍ من مدينة ميليتوس Miletus، حيث نُسِب إلى الفيلسوف طاليس Thales اكتشافُ أنَّ من شأنِ نوعٍ معين من الأحجار أن يَجذبَ الحديدَ وغيرَه من الأحجار من النوعِ ذاته، على الرغم من أنه عُثِر على سجلات أقدمَ حولَ هذه الظاهرةِ في الصين. وفي الغرب، استُخدِمَت قطعةٌ من

هذا الحجر على شكلِ إبرةٍ تتدلّى من خيطٍ في المِلاحة؛ إذ وُجِد أنها تُشير إلى اتجاهِ الشمال-الجنوب. وسُميَت هذه الأداةُ التي تحدِّد المسارَ بالإنجليزية lodestone (أي حجَر المسار)، من الكلمةِ الإنجليزية القديمة lode بمعنى طريق أو مَسار.

الأمرُ الغريب بشأنِ حجَر المسار، أو المغناطيس، هذا هو أنه يُمارِس تأثيرَه عن بُعد، وليس عن طريقِ الاتصالِ المباشر. فالمغناطيسُ يَجذبُ الحديدَ من مسافةٍ لا تقلُّ عن بِضعةِ سنتيمترات في حالة المغانط الضعيفة، أو مسافةٍ أكبرَ من ذلك في حالةِ المغانط القوية. وتطوَّرتْ فكرةُ أن المغناطيسَ مُحاطٌ بمجالٍ أو قوةٍ من نوعٍ ما، وهذه طريقةٌ أخرى للقول بأنه يُمارِس تأثيرَه عن بُعد.



7- شكلٌ إيضاحي ورَدَ في كتاب «عن المغناطيس» لوليام جيلبرت، يبيِّن كيف أن رؤيةَ الأرض بوصفها مغناطيساً عملاقاً تفسِّرُ الاختلافاتِ في ميلِ إبرةِ البوصلة على ارتفاعات مختلفة. لاحِظْ أن خطَّ الاستواء رأسيٌّ في هذا الرسم، وأنَّ القُطبَيْن المغناطيسيَّيْن موجودان على اليمين واليسار.

لكنْ تبيَّنَ أن مفهومَ المجالِ مفيدٌ للغاية، خاصةً في ضوءِ أن خواصَّ المجالِ يُمكِن تحديدُها كَمِّياً بصورة رياضية. وعلى سبيل المثال، المجالُ المحيط بأي مغناطيسٍ له شكلٌ معيَّن من الممكن أن نجعلَه مرئياً عن طريقِ نثر شذراتِ الحديد (بُرادةِ الحديد) على ورقةٍ تحتها مغناطيس، وهو ما يُنتِج نمَطاً رأيناه جميعاً من خطوطِ المجال التي تبدأ عند أحدِ طرفَي المغناطيس - أحدِ «قُطبَيْه» - وتنتهي بصورةٍ مُنحنِية عند الطرفِ الآخَر.

ويَسلُك قُطبا المغناطيس سلوكاً شبيهاً بنوعَي الشِّحْنة الكهربية؛ إذ يَنجذب القُطْبان المختلفان أحدُهما نحوَ الآخَر كما تَنجذبُ الشِّحْناتُ المتباينة، ويتنافرُ القُطْبان المتشابهان كما تتنافرُ الشِّحْنات المتشابهة. وهكذا، إذا قرَّبتَ مغناطيساً من آخَر، فسينجذبُ القُطبُ الشمالي للمغناطيس الأول إلى القُطب الجنوبي للمغناطيس الآخر. ومثلما أوضَحَ جيلبرت، فإن كوكبَ الأرض نفسه يَسلُك سلوكَ مغناطيس ضخم ذي قُطْب شمالي وقُطْب جنوبي يَتوافقان بصورةٍ تقريبية - ولكن ليس تماماً - مع

القُطْبَيْن المغناطيسيَّيْن الشمالي والجنوبي للكوكب. (المحورُ المغناطيسي للأرض مائلٌ بحوالي 10 درجات، ويتحرَّك ببُطْء. سنتناول هذا الأمر بمزيدٍ من التفصيل في فصل لاحق). ويُعَرَّف القُطبُ الشمالي للمغناطيس بأنه النقطةُ التي تشير نحوَ القطبِ المغناطيسي الجنوبي للأرض، بحيث إن القُطبَ الذي يشير نحوَ الشمالِ هو القُطبُ المغناطيسي الجنوبي. والقطبُ الشماليُّ للمغناطيس ينجذب إلى القُطبِ المغناطيسي الجنوبي للأرض، الذي يقع في وقتِنا الحالي في الشمالِ الجغرافي.

لنَعُد إلى قياساتِ هيل. إذا كانت الأرضُ مغناطيسية الطابع، وإذا كانت هناك معالم على الشمس بها دوَّاماتٌ وبنى أخرى تجعلها تبدو كما لو كانتْ مغناطيسيةً، فحينئذٍ من المعقولِ مُحاوَلةُ قياسِها لمعرفةِ ما إذا كانت مغناطيسيةً حقاً، وهو ما فعَلَه هيل.

ما البُقْعة الشمسية؟

نحن الآن مُستعِدُّون للتساؤُل عن ماهيةِ البُقْعة الشمسية. لدينا الصورةُ الجميلة الموضَّحة في الشكل رقم 2، لكن ما الذي نراه فيها؟

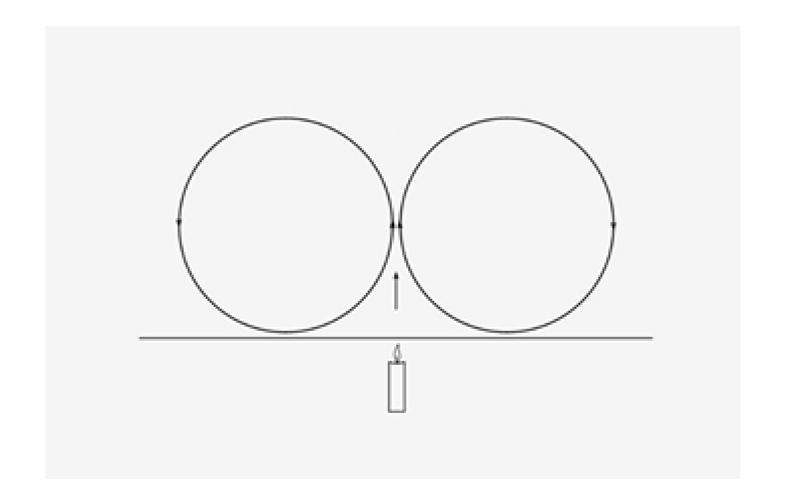
يُمكِننا تمييزُ ثلاثةِ أجزاءٍ في هذه الصورة. أولاً، هناك منطقةٌ معتمة، شبهُ دائرية، تُعرَف باسم umbra (وهي كلمةٌ لاتينية تعني «الظلّ»)، وهي البقعةُ التي يُمكِننا رؤيتُها بالعين المجردة عند النظر إلى الشمس (مع توخِّي الحِرْص واتخاذ الإجراءات الوقائية المناسبة). ويحيط بهذه المنطقة نمَطٌ دوَّار، يَظهر باللون البُني الضارب إلى الحُمْرة في هذه الصورة، مكوَّنٌ من شرائطَ تُشبِه الخيوطَ، ويُعرَف باسم شِبْه الظِّل penumbra. لكن هاتَيْن الكلمتَيْن لا تعبِّران بصورةٍ ملائِمة عمَّا نراه هنا؛ إذ استُخدِمتا لوصفِ الظلال وحسب، لكن البقعةُ الشمسية تبدو بالفعل أشبهَ بالظلِّ العميق والظلِّ الجزئي الذي نراه في الكسوف، سواء نظرنا إليها بأَعيُنِنا المجردة أو باستخدامِ تلسكوبٍ بسيط. وأخيراً، هناك منطقةٌ خلفية تتكوَّن من العديد من الحُبَيْبات ذات اللون الذهبي، ويُطلَق عليها بالفعل اسمُ الحُبَيْبات granules. وهذه الحُبَيْباتُ تشكِّل الخلفيةَ الثابتة للمناطقِ الخالية من البُقَع على سطح الشمس، وتمثِّل السطحَ الطبيعي الذي تَظهر فيه البُقَعُ الشمسية. وهي نوعٌ من الحركة الفوَّارة المسمَّاة الحَمل الحراري، وتوجد بصورةٍ تقليدية في أيِّ غازٍ أو سائلٍ يُسخَّن من الأسفل. ربما تبدو الشمسُ مُصمتةً، لكنها في الحقيقة عبارة عن كرةٍ ضخمة من الغاز الكثيف، وتتكوَّن في الأساس من غازِ الهيدروجين والهيليوم. والوصفُ الأفضل للشمس هو أنها مائعٌ fluid، وهو وصفٌ يتضمَّن الحالاتِ السائلةَ والغازيةَ والبلازما (وهي حالةٌ سائلةٌ أو غازيةٌ تنفصل فيها الإلكتروناتُ إلى حدٍّ كبير عن ذرَّاتِها، وهو ما يُمكِّن المادةَ من أن تتَّصِفَ بالتوصيل الكهربي) بوصفها حالاتٍ مُمكِنة للمادة.

يَجدرُ بنا الاستطرادُ في الحديث عن الموائع. في الاستخدام العام، تكونُ كلمةُ «مائع» مرادفةً تقريباً لكلمةِ «سائل». لكنْ من المنظورِ الفيزيائي فإن الخاصيةَ الفارِقة الأساسية للمائع هي أن شكْلَه يتشوَّهُ بسهولةٍ عند التعرُّض إلى ضغط. فالماءُ يأخذُ شكلَ الحاوية الموضوع فيها، ويتدفَّق منها إذا انقلبت استجابةً إلى قوةِ الجاذبية، بدلاً من السقوطِ على هيئةِ كتلةٍ صلبة، مثلما يفعلُ مكعَّبُ

الثلج.[4] ويحدث ذلك النوع نفسه من التشوُّه، وإن كان بصورةٍ أقلَّ حِدةً، مع الهواء عندما تَستخدمُ مروحةً؛ إذ تتسبَّب المروحةُ فـي جعْلِ الهواءِ يتدفَّق بعيداً عن دفعةِ الريشات الدوَّارة. والغازات والبلازما، اللذان يتشوَّهان ويتدفَّقان مثل السوائل، هما أيضاً من الموائع.

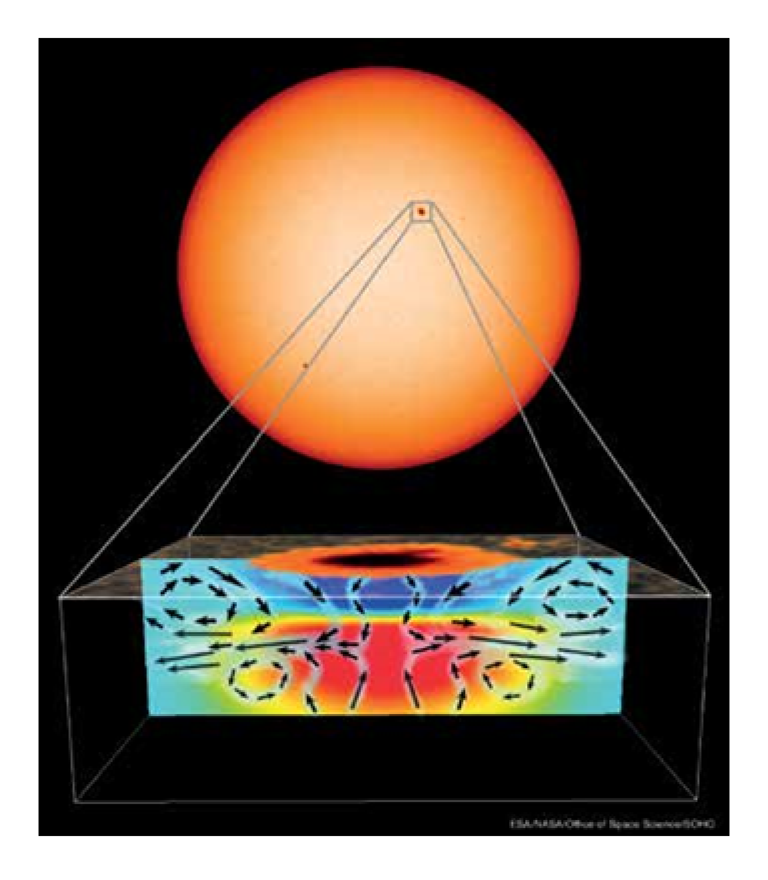
الحُبَيْبات التي نراها على سطحِ الشمس هي تدفُّقات للمائع، وهي تشبهُ التياراتِ الصاعدةَ والفُقَّاعات التي تراها في قِدْرٍ من الماء المَغْلي مثلاً. يحاولُ المائعُ نقْلَ الحرارة من السطح السفلي، حيث تُمتَصُّ الحرارةُ من اللهب، إلى السطحِ العلوي، حيث تستطيعُ الحرارةُ الهروبَ إلى الهواء. إن الظروفُ داخلَ الشمس تشبهُ ذلك، إذ تُحاوِلُ الطاقةُ الموَلَّدة بواسطةِ العملياتِ النووية التي تمد الشمس بالطاقة، الخروجَ من النطاقِ الداخلي العميق، والهروبَ عبر السطح المرئي للشمس. ويُعَد الحَمل الحـراري - وهو حركةُ المائع - وسيلةً شديدةَ الفاعلية لنقل الحرارة، ويحدث كثيراً في السوائل والغازات، ويسبِّب نقْلَ المادة من المواضع الساخنة إلى المواضع الباردة. وعلى سبيل المثال، يوجد في الغِلاف الجوي للأرض خلايا حَمل حراري دوارةٌ كبيرةٌ تَنقلُ الهواءَ الدافئ من خط الاستواء إلى القُطْبَيْن، والهواءَ القُطْبي البارد إلـى خـط الاستواء. وهكذا، مثل الغِلاف الجوي الأرضي، ليستِ الشمسُ جِسْماً صُلباً، وتحـدث فيهـا مجموعـة متنوّعة مـن الحركات التي يُمكِن أن يتحملها المائع وليس الجسم الصلب.

في غياب البُقَع الشمسية، يُرى نمطُ الحَمل الحراري الحُبَيْبي في كلِّ مكانٍ على سطح الشمس. والبُقعةُ الشمسية شيءٌ دَخِيلٌ على هذا السطح الطبيعي، الذي يتغيَّر في وجودها. وهذه التغيُّراتُ لها دورٌ محوري في تفسيرِ ما نراه في الصورة. أولاً، لماذا تكونُ البُقْعةُ الشمسية داكنة اللون؟ توضِّح القياساتُ الدقيقة أن سببَ هذا هو أن البُقَعَ الشمسية أبردُ من بقيةِ سطح الشمس. وكلمةُ «أبرد» لها معنى نسبيٌّ هنا؛ إذ تتراوح درجةُ حرارة البُقَع الشمسية في المعتاد بين 3000 و4000 كلفن، في حين تبلغُ درجةُ حرارة السطح الحُبَيْبي الذي ينبعث منه ضوءُ الشمس - والمُسمى الغِلاف الضوئي - 5780 كلفناً. وهكذا فـإن البُقَعَ الشمسية تُعادِل من حيـث الحـرارة والسطوع النجومَ الصغيرة الباردة المعروفة بالأقزام الحمراء، التي تكونُ بطبيعتها (أيْ بصورة مُطلَقة) أشدَّ خُفوتاً بكثيرٍ من الشمس. إن كَمِّيةَ الضوء التي يَبعثها الجسمُ الساخن تتناقصُ بسرعةٍ كلما انخفضتْ درجةُ حرارته، والأقزامُ الحمراء أصغرُ كثيراً أيضاً من الشمس، ولهذَيْن السببَيْن فإنها تبعث ضوءاً أقلَّ بكثير. وفي درجات الحرارة التقليدية للبُقْعة الشمسية، يساوي سطوعُ البُقْعة قرابةَ خُمْسِ سطوعِ الغِلاف الضوئي. ولو كانت الشمسُ كلها بهذا السطوع لَظلَلْنا قادِرين على رؤيتها بسهولة، لكنها ستسطعُ بلونٍ أحمرَ باهتٍ، وستكون الأرضُ باردةً للغاية. وتبدو البقعةُ الشمسية داكنةً مُقارَنةً بما حولها؛ لأن العينَ أو الكاميرا تتأقلم مع مستوى السطوع المتوسط.



8- مصدرُ الحرارة الموجود أسفلَ المائع سيسخِّن المائعَ مَوْضعياً، ممَّا يجعله أقلَّ كثافةً ومن ثَم يرتفع، وبذلك يَستحِثُّ تياراً يحملُ الحرارةَ لأعلى. بعد ذلك، يُعاوِدُ المائعُ الدورانَ عن طريقِ التدفُّق جانبياً كي يبتعدَ عن طريقِ المائع الإضافي المرتفع، ثم يَبرد ويَغوص مجدداً في دورةٍ من النقل الحراري.

لكن هذا يعَدُّ نِصف إجابة لا أكثر؛ فالبُقَعُ الشمسية معتمةٌ لأنها باردة (نسبياً). لكنْ لماذا؟ للإجابة عن هذا السؤالِ علينا العودةُ إلى طبيعةِ المجالات المغناطيسية وإلى العالِمِ الدنماركي هانز كريستيان أورستد Hans Christian Ørsted في عام 1820. كان أورستد أحدَ أتباعِ الفيلسوف إيمانويل كانط Immanuel Kant، وكان يؤمن بفكرةِ كانط عن وَحْدةِ الطبيعة، وكان صديقاً للفيلسوف فريدريك شيلن Friedrich Schelling، الذي أسَّسَ مدرسةَ الفلسفة الطبيعية *Naturphilosophie* المَبْنية على الإيمانِ بأن الطبيعةَ كلها قابلةٌ للاشتقاق من مبدأ أول واحد. كان أورستد مهتماً بالكهرباء والمغناطيسية، وكان يبحث عن طريقةٍ لتوحيدهما؛ إذ لاحظ أثناء إحدى المُحاضَرات أن التيار الكهربي المتدفِّق في أحدِ الأسلاك سبَّبَ انحرافَ إبرةِ بوصلةٍ مغناطيسية قريبة، بحيث تعامَدتِ الإبرةُ على اتجاه السلك. وقرَّرَ أورستد مُتابَعةَ هذا التأثير العجيب، وبعدَ تجارِبَ تفصيليةٍ تحقَّقَ من أن التيارَ الذي يتدفَّقُ عبر السلك يُنتِج مجالاً مغناطيسياً حولَ السلك، في مستوى عمودي على اتجاهِ التيار. ويُمكِنك التفكيرُ في المجال على أنه يشكِّل نمَطَ مركزِ الهدف (أو عين الثور) المؤلَّف من دوائرَ مُتحدةِ المركز، وأن التيار سهم العموديّ على مركز الهدف. إن التيارَ الكهربي المارَّ في السلك يؤثِّر بصورةٍ ما على الفضاء المحيط به، وفي اتجاهٍ عموديٍّ عليه.



9- التفاعُلاتُ المعقَّدة بين حُزْمةِ مجالٍ مغناطيسي قوية تُعِيق تدفُّقاتِ الحَمل الحراري في الشمس، وحركاتُ المائع الصاعدة والهابطة قُرْبَ السطح، توضِّح التفاصيلَ الدقيقة والمعقَّدة للبُقْعة الشمسية. وتساعد التدفُّقاتُ المتقاربة أسفلَ السطحِ مباشَرةً في الحفاظ على تماسُك البُقْعة.

أثارَ هذا الاكتشافُ الكثيرَ من الاهتمام؛ إذ جمَعَ بين مجالَيْن منفصِلَيْن من مجالات الدراسة؛ ألا وهما ظاهرتَا الكهربية والمغناطيسية. وألهَمَ الاكتشافُ أُناساً آخَرين، أمثال أندريه ماري أمبير André- Marie Ampère، ولاحقاً مايكل فاراداي Michael Faraday، بمُواصَلة التجارب، وهو ما أدَّى في النهاية إلى مَوْلِدِ مجالٍ جديدٍ في الفيزياء؛ ألا وهو الكهرومغناطيسية.

يكمُن وجْهُ ارتباطِ هذه الاكتشافات التي تحقَّقتْ في المختبر بمُناقَشتنا في أنه يوجد فيما يبدو تناظُرٌ بين السلوكيات الكهربية والمغناطيسية؛ فمثلما تنحرفُ بوصلةُ المغناطيس ومجالُها المغناطيسي بفعل التيار الكهربي، وُجِد أيضاً أنه إذا حاوَلَ تيارٌ كهربي عبورَ مجالٍ مغناطيسي، فإنه سينحرفُ بالتبعيةِ بسبب المجال المغناطيسي ويُجبَر على الدوران حولَه. والحالةُ الوحيدة التي لا يَنحرفُ فيها اتجاهُ التيار هي عندما يتحرَّك التيارُ بصورةٍ موازية للمجال المغناطيسي، بدلاً من محاوَلةِ عبوره. وهكذا فإن الجسيماتِ المشحونةَ التي تشكِّلُ التيارَ الكهربي تجدُ أن التحرُّكَ بجانب المجال المغناطيسي أسهلُ من عبوره؛ ومن ثَمَّ تكونُ مُجبَرةً على التحرُّك في هذا الاتجاه بسببِ وجودِ المجال.

هذا هو موقفُ المناطقِ القريبة من البُقَع الشمسية على الشمس. إن الغِلافَ الضوئي بما به من خلايا حَملية في حالةٍ متواصِلةٍ من الحركة المتقلِّبة؛ إذ يَصعدُ المائعُ الساخن وينتشرُ كالحُمَم المتدفِّقة ثم يبرد. وبعد ذلك يَغوصُ المائعُ الأبرد (نسبياً) عند الحدود بين الخلايا الحملية، على النحوِ المبيَّن في الشكل رقم 8. وعندما يتخلَّل المجالُ المغناطيسي القوي للبُقْعة الشمسية بلازما الغِلاف الضوئي الفوَّارةَ والموصِّلةَ للحرارة، فإنه يُعِيق تحركاتِ الحَمْل الحراري، ويَمنعُ المادةَ الساخنة من اجتيازِ حُزْمةِ المجال المغناطيسي القوي، وبدلاً من ذلك يسبِّبُ انحرافَ المادة المتدفِّقة إلى الخارج نحوَ المنطقةِ الهادئة الخالية من المجالات المغناطيسية. وهذه الإعاقةُ للتدفُّق الحر للمادة الناقلة للحرارة تثبِّط قُدْرةَ الحَمل الحراري على نقلِ الحرارة إلى الأعلى نحوَ سطحِ الشمس؛ وهو ما يسبِّب نقْلَ قَدْرٍ أقلَّ من الحرارة إلى المنطقة المُمغنطة، ويجعلها أبردَ من المناطقِ المحيطة بها. وبهذا تكون البُقَعُ الشمسية أبردَ وتبدو داكنةً.

يُظهِر الشكلُ رقم 9 محاوَلةً لتوضيحِ جزءٍ ممَّا يحدثُ أسفلَ السطح المرئي للشمس على مَقربةٍ من بُقعةٍ شمسية، على الرغم من أن قُدرتَنا على تحديدِ ما يحدث تحت سطح الشمس لم تزل محدودة. ثمة أشياء كثيرة تحدثُ داخلَ البقعة الشمسية وحولَها، من ضمنها حُزمة كبيرة من المجال المغناطيسي القوي؛ تلك المنطقةُ الزرقاء التي على شكل قمع تحت السطح مباشَرةً وتبيِّن المواضعَ التي تنخفض فيها سرعةُ الصوت؛ وهو ما يشير إلى درجاتِ حرارةٍ أقل، في حين تشير المنطقةُ الحمراء الأقلُّ وضوحاً إلى الأسفل إلى ارتفاع سرعة الصوت. وهذا العمودُ (المُفترَض) من المجال المغناطيسي القوي يَبرزُ من بحرٍ فوَّارٍ هائج من حركاتِ المائع التي توضِّحها اتجاهاتُ الأسهم. ويتحدَّد مظهرُ البقعة الشمسية، الموضَّح في الصورة الواردة في بداية هذا الفصل، بواسطةِ التفاعُل بين تدفُّقاتِ المائع الصاعدة وحُزْمةِ المجال المغناطيسي التي تتخلَّلها، والطريقةِ التي تتوافق بها هاتان العمليتان.

وتبيِّن قياساتُ مَناطقَ كتلك المبيَّنة في الشكل 2 أن حُزْمةَ المجال المغناطيسي تبدأُ بصورةٍ رأسية في مركزِ البقعة في منتصف منطقة الظل، لكن المجالَ يبدأ في فقدانِ قُوَّته ويميلُ عن الوضع الرأسي كلما ابتعَدْنا عن المركز. وفي حالةِ البُقَع الكبيرة، يُطوى جزءٌ من المجال المغناطيسي عند الحوافِّ الخارجية لحُزْمة المجال المغناطيسي فجأةً إلى الأسفلِ وصولاً إلى السطح، حيث يشكِّل منطقةَ شبهِ الظِّل الشبيهة بالقرحيَّة. لم يزل سببُ وضوحِ الحد الفاصل بين منطقةِ الظل ومنطقةِ شِبه الظل محلَّ نقاشٍ نَشِط، ويظل هناك الكثير من الأشياء التي لا نفهمها بشكلٍ كامل: هل حُزْمةُ المجال المغناطيسي أسفلَ السطح عبارة عن حُزمةٍ واحدة متجانسة، شبيهةٍ بباقةِ الزهور المربوطة بإحكام، أم تنفصلُ المجالات إلى عددٍ من الحُزَم الأصغر، الشبيهة بمَجسَّاتِ قنديل البحر، وهو النموذج المسمَّى نموذجَ ميدوسا أو نموذجَ السباغيتي؟

على أي حال، فإن شِدةَ المجال المغناطيسي تزدادُ كلما اتجهنا إلى الأسفل، وينضغطُ إلى قُطْر عَرضي أصغر بسببِ الضغط المتزايد للشمس كلما توغَّلْنا أكثرَ داخل الشمس. ويرجعُ سببُ البرودة النسبية للبُقَع الشمسية إلى هذه البِنْية الشبيهة بالقمْع؛ إذ إن الحرارةَ المتدفقة إلى الأعلى تنتقلُ على امتدادِ حُزْمةِ المجال المغناطيسي، وتنتشر إلى الخارج مع حركتها لأعلى لأن قُطْرَ البِنْية المغناطيسية يزدادُ اتساعاً. وهكذا فإن الحرارة تنخفض لأنها تُوَزَّع على مساحةٍ أكبرَ؛ ومن

ثمَّ ينتهي الحالُ بالبُقْعة الشمسية بأن تكون كثافة الطاقة فيها أقلَّ من الأجزاء المحيطة بها الخالية من المجالات المغناطيسية على سطح الشمس.

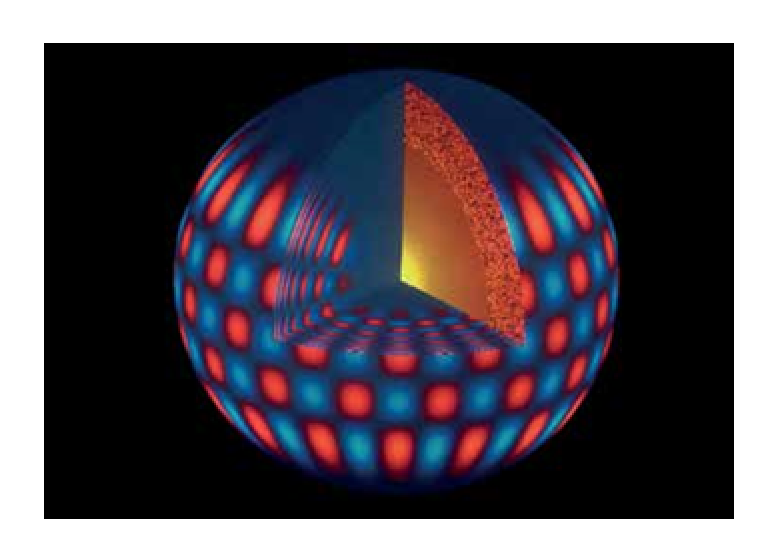
لم يزل لدينا لغزٌ صغير: إذا كانت البُقْعةُ الشمسية مكاناً يُشَع منه قدْرٌ من الطاقة أقلُّ من المعتاد، وهذه الطاقةُ تنحرف بعيداً عن حُزمةِ المجال المغناطيسي القوي في البُقْعة الشمسية، فلا بدَّ أن هناك مكاناً آخَر يُشَع فيه قدرٌ من الطاقة أكبرُ من المعتاد. في النموذج الموضَّح أعلاه، من المفترَض أن توجدَ حلقةٌ ساطعة من الانبعاثِ الإضافي تحيط بالبقعة الشمسية؛ نظراً لانحرافه بعيداً عن منطقةِ البقعة. لكن لم تُرصَد حلقةٌ كهذه، بالرغم من القياسات الدقيقة والحسَّاسة. لماذا لم يحدث هذا؟ ربما تتمثَّلُ الإجابة في أن قُدْرةَ هذه الحُبَيْبات الدقيقة على نقلِ الطاقة فعالة جداً جداً، ليس في الاتجاهِ الرأسي فقط - من داخل الشمس إلى سطحها - ولكن أيضاً في الاتجاهِ الأفقي. وتُوَزَّع الطاقةُ الإضافية بصورةٍ شديدةِ الكفاءة بواسطةِ هذه الحُبَيْبات الفوَّارة خلال انتشارها بعد ظهورها على السطح، بحيث تَحملُ الحرارةَ عبرَ مناطقَ كبيرةٍ من السطح المحيط بكلِّ بُقْعةٍ شمسية. وهذا يتسبَّب في نهاية المطاف في تخفيفِ السطوعِ الإضافي إلى مستوياتٍ صغيرة جداً؛ وهو ما يجعل تأثيرَ الحلقة الساطعة شديدَ الضآلةِ بحيث يتعذَّر رصْدُه.

نختتمُ حديثَنا بتوضيحِ أمرٍ مثيرٍ للدهشة: لقد بدأ هذا الفصلُ بمُناقَشةِ مُشاهَداتِ البُقَع الشمسية المرئية بالعين المجردة. وفي الحقيقة، كان ينبغي علينا أن نلتزمَ بالحديثِ فقط عمَّا يُمكِنُنا رؤيتُه مباشَرةً، على سطح الشمس، لكننا، بصورةٍ ما، ناقَشْنا أيضاً ما يحدثُ تحتَ سطحِ الشمس، في باطنها. كيف يُمكِن هذا؟ كيف يُمكِنُنا معرفةُ ما يحدثُ في قلبِ الشمس الذي لا يُمكِننا رؤيتُه مباشَرةً؟ هذا هو موضوع الفصل التالي.

الفصل الثاني
إلقاء نظرة داخل الشمس

في الثالث والعشرين من أغسطس عام 2011، وفي تمام الساعة 1:51 مساءً، ضرَبَ زلزالٌ بقوةِ 5.8 ريختر الساحلَ الشرقي للولايات المتحدة، وكان مركزُه السطحي في ولاية فيرجينيا. لم يكن زلزالاً قوياً بشكل خاص؛ حتى إن صديقاً من كاليفورنيا بعث رسالةً لأحدِنا قال فيها: «إن زلزالاً بقوةِ 5.8 لا يجعلنا حتى نَقْطع حوارنا!»، لكنه كان غيرَ مألوفٍ في هذا الجزء من العالَم، وأتاح للسكان من جورجيا وحتى كندا الفرصةَ كي يُعايِشوا الاهتزازاتِ الناجمةَ عن حدَثٍ كهذا. وفي غضونِ دقائقَ، شعر الناسُ على بُعْد مئات بل آلاف الأميال بهزَّةٍ أرضية دامتْ لبُرْهةٍ وجيزة. وبالنسبة إلى هؤلاء الذين انتبهوا انتباهاً حثيثاً، كان هناك حَدَثان في الواقع، أولاً حركةٌ إلى الأعلى والأسفل، ثم بعدَ مُضِي بضعِ ثَوانٍ وقَعَ حدَثٌ منفصلٌ آخَرُ تمثَّلَ في تأرجُحٍ من جانب إلى الآخَر. في هذه الملاحَظة البسيطة تَكمُن ثروةٌ من الاحتمالات التي تساعدنا على فَهْمِ الأرض والشمس أيضاً.

كان ريتشارد ديسكون أولدهام Richard Dixon Oldham من العاملين لدى هيئةِ المساحة الجيولوجية الهندية، وهو جيولوجيٌّ بريطاني وُلِد في دبلن عام 1858، وبالرغم من أنه كان يعُدُّ نفسَه جيولوجياً، فقد اشتهرَ بدراساته حولَ الزلازلِ، في فرعٍ معرفي يُسمَّى «عِلم الزلازل» seismology.



10- مَشهدٌ مَقْطعي للشمس يُظهِر واحداً من أنماطها الاهتزازية.

وخلال عمله في الهيمالايا، وهو إقليمٌ مكوَّنٌ من قِممٍ جبلية عملاقة تشكَّلتْ بفعلِ تراكُمِ القشرة الأرضية نتيجةَ تصادُمِ الصفيحة التكتونية الهندية مع الصفيحة الأوراسية، كتب مقالاً مهماً - يُمكِن أن يُوصَفَ بأنه غيرُ مسبوق - حول زلزالٍ قوي ضرب إقليمَ آسام في شمال شرق الهند عام 1897. ووصَفَ في هذا التقرير بتفاصيلَ بالغةِ الدقة طبيعةَ الصَّدْعِ الدفين وعلاقتَه بالموجات المدمِّرة التي انتشرتْ من الإقليم المرتفع، والذي حرَّرَ هذا القَدْرَ من الطاقة الهائلة في هذا الحَدَث.

تقاعَدَ أولدهام من الخدمة في عام 1903، ونشَرَ في عام 1906 دراسةً عن الزلازل تحدَّثَ فيها تفصيلياً عن الموجات التي تولِّدها هذه الأحداث. وأزاحَ تحليلُه الستارَ عن اكتشافَيْن كبيرَيْن: أولاً، أن هناك أنواعاً عديدةً مختلفةً من الموجات التي تنطلق من أي زلزال. وثانياً، أن الزلازلَ التي رُصِدت على الجانب الآخر من الأرض من المَصْدر أظهرتْ وجودَ نوعٍ آخَرَ متأخِّرٍ من الموجات. وانطلاقاً من هذا الكشف الأخير، توصَّلَ أولدهام إلى استنتاج مذهل، لكنه صحيحٌ، يفيد بأن الأرضَ لها لبٌّ مُكوَّنٌ من مادةٍ ما تنقلُ الموجاتِ على نحوٍ أبطأَ من الوشاح العلوي والمحيط، بل نجَحَ أيضاً في التوصُّل إلى تقديرٍ دقيقٍ لحجمِ هذا اللُّب.

واقترح أولدهام في تقريرِه الذي نشره عام 1906 إجراءَ دراسةٍ دقيقة للمَوْجات الزلزالية لفحْصِ باطنِ الأرض:

تماماً كما فتَحَ المِطْيافُ البابَ أمامَ سبْرِ أغوارِ حقائقَ فلكيةٍ جديدة، بمساعَدة عالِم الفلك على تحديدِ بعضٍ من العناصر التي تتكوَّن منها النجومُ البعيدة، حقَّقَ مِقياسُ الزلازل الإنجازَ ذاته أيضاً؛ إذ يسجِّل الحركةَ غيرَ المحسوسة للزلازل البعيدة، مما يساعدنا على إلقاءِ نظرةٍ داخلَ الأرض والتعرُّف على طبيعتها بدقةٍ بالغة، إلى نقطةٍ محدَّدة، وكأنَّ بوسعِنا الزجَّ بنفقٍ بداخلها وأخْذَ عيناتٍ من المادة التي يمرُّ بها النَّفَق.

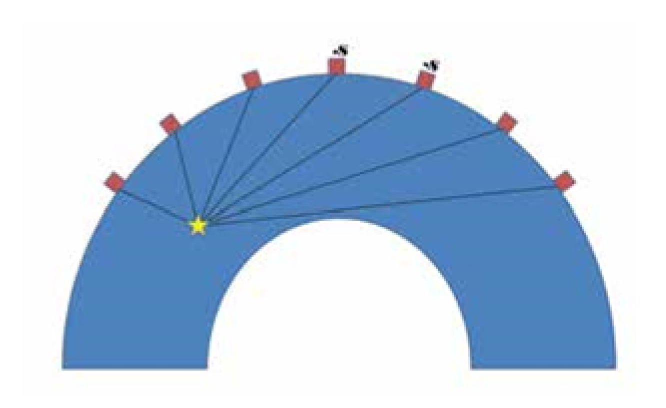
تضمُّ هذه الفقرةُ الواحدةُ المأخوذة من مقاله الكثيرَ من المعلومات، وسوف يستغرقُ شرْحُها على نحو تامٍّ نقاشاً مُطولاً. لقد أثبتَ أولدهام بالفعل في عام 1900 أن الاضطراباتِ المنتشرةَ من أيِّ زلزالٍ تنقسمُ إلى ثلاثةِ أنواعٍ من الموجات: موجةٍ سطحية، وموجةٍ أولية أو طولية (تُسمَّى «الموجة P»)، وموجةٍ ثانوية (أو موجة القصِّ، التي تُعرَف أيضاً باسم «الموجة S»). الموجاتُ التي نراها على مياه المحيط هي موجاتٌ سطحية، تنتقلُ على امتدادِ السطح الفاصل بين وسَطَيْن لهما كثافتان مختلفتان، وهما في هذه الحالةِ الماءُ والهواء. وهذه هي الموجاتُ الأبطأُ حركةً بين الأنواع الثلاثة، والأشدُّ تدميراً أيضاً. الموجةُ الأسرع هي الموجةُ الانضغاطية، الناتجةُ عن الضغط على مادةٍ مَرِنة، ممَّا يولِّد انضغاطاً اهتزازياً وتخلخلاً يَسْري «عبر» الجسم، وينتقل هذا النوعُ من الموجات داخلَ الوسَط، وليس على امتدادِ سطحِه الخارجي. ربما رأيتَ لعبةَ «سلينكي» Slinky وهي تفعل هذا إذا أمسكتَ بها من طرَفِها، وتركْتَها تتدلَّى رأسياً، ثم حرَّكتَ الطرفَ الممسوك لأعلى وأسفل. والنوعُ الثالث هو الموجةُ العَرضية، الناتجة عن اهتزازِ المادة من جانبٍ لآخَر؛ أيْ قَصُّ المادة. تتحرَّك هذه الموجة كذلك عبرَ الوسَط، وتنتقل عبرَ اهتزازٍ جانبي للمادة. من الخواصِّ الملحوظة للموجات العَرضية أنها لا تنتشرُ عبرَ سائل؛ لأن السوائلَ تتدفَّق جانبياً فقط في حالةِ هزِّها من جانبٍ لآخَر؛ ومن ثَم لا تتولَّد أيُّ موجةٍ بهذه الطريقة.[5]

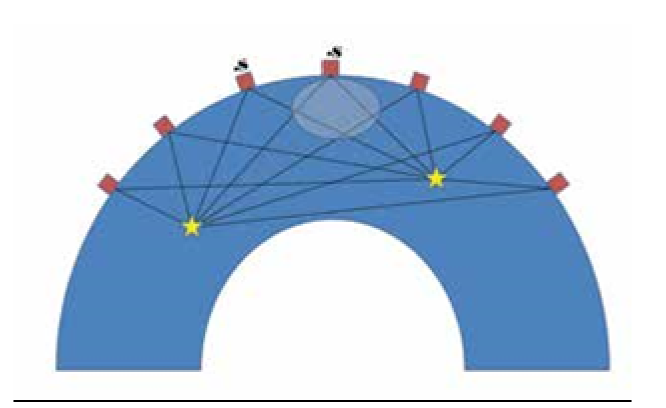
ماذا كان اقتراحُ أولدهام تحديداً كي نتمكَّنَ من إلقاءِ نظرةٍ داخل الأرض؟ لنفترِضْ أنَّ لدينا صَفاً من مقاييسِ الزلازل المنتشرة على سطح الأرض - وهذه حقيقةٌ فعلية - وأن حدَثاً ما وقَعَ في مكانٍ ما داخلَ الأرض. تنتشر الموجاتُ في جميع الاتجاهات انطلاقاً من ذلك الحدَثِ وتُرصَد في المواقع المختلفة بواسطة أدوات الرصد المختلفة. ونظراً لأن المسافاتِ وصولاً لمقاييس الزلازل تختلف، فإن أزمنة الوصولِ سوف تختلف - فالمقاييسُ الأقربُ سترصدُ الحدَثَ في وقتٍ أبكَر - ومن الممكن استخدامُ هذه الرابطةِ للزمن في مقابلِ المسافة في تحديدِ مصدرِ الاضطراب، باستخدام طريقة التثليث[6]، ومعرفةِ أين حدَثَ الزلزال. ولكنْ، في الإمكان فعْلُ ما هو أكثر من ذلك. افترِضْ مثلاً أن جميعَ المحطَّات رصدتْ الموجات الأولية، بيْدَ أن بعضَها فقط رصَدَ الموجة الثانوية، في حين لم يَرْصدها قطاعٌ واحد آخَر، كما هو موضَّح في الشكل 11. نعلم حينئذٍ أن هذا القطاع، الموضَّح بالتظليل المتعارض، يشتملُ على كتلةٍ ضخمة من السائل في موضعٍ ما بداخله؛ لأن السوائل لا تسمحُ بعبورِ الموجات الثانوية عبرها.

وإذا أضَفْنا حدَثاً ثانياً من موقعٍ آخَر إلى الحدَثِ الأول (الشكل 12) فسنرى أن ثَمةَ قِطاعاً مختلفاً لا يسمحُ بانتشارِ الموجات الثانوية؛ مما يعني أنه يضمُّ مكوناً سائلاً في موضعٍ ما بداخله. وبإضافةِ الاثنين معاً، نجد قِطاعاً أصغرَ، يتكوَّن من تقاطُعِ هذين القطاعَيْن، من المؤكَّد أنه يحتوي على كتلةٍ سائلة. هناك العديد والعديد من الزلازل التي تُرصَد، وخاصةً عند استخدامِ مقاييس زلازلَ حسَّاسة يُمكِنُها رصْدُ أحداثٍ أصغرَ من أن تُستشعَر. وتلك الأحداثُ هي التي كان أولدهام يَعْنيها بعبارته «الحركة غير المحسوسة للزلازل البعيدة».

تُشبِه العمليةُ التي وصفناها أساليب التصويرِ المقطعي المُستخدَمة في الفحص بالتصوير المقطعي المحوسب، أو التصوير بالرنين المغناطيسي، وفيها يتحرَّك صفٌّ من المستشعرات تسلسُلِياً حولَ مكانٍ ما (رُكْبتك مثلاً) عدةَ مراتٍ من أجلِ تكوينِ صورةٍ ثلاثيةِ الأبعاد للتراكيب

الموجودة بها، عن طريقِ تحليلِ جميعِ الصور المفردة. وكلٌّ مسحٍ يُسفِر فقط عن إسقاطٍ ظليٍّ ذي بُعد واحد أو بُعدَيْن للتركيب المُصَوَّر، ولكن من خلالِ إسقاطِ هذه المَسْحات بزوايا مختلفةٍ حول الجسم يصير من المحتمَل إعادةُ بناءِ شكلِ الجسم المراد رؤيته عن طريق التحليلِ الحاسوبي.





11- من الممكن استخدامُ مصفوفةٍ من مقاييس الزلازل المنتشرة على سطح الأرض لتحديدِ مكانِ وقوعِ الزلزال، وكذلك معرفة بعضِ خواصِّ المادة التي تمر عبْرَها الموجاتُ في أثناء انتقالها نحوَ أداةِ القياس. في هذه الحالة، تقيسُ معظمُ مقاييس الزلازل الموجات الأولية والثانوية، في حين لا تسجِّل محطتان (موضَّحتان بالرمز - S) أيَّ موجات ثانوية؛ مما يشير إلى وجودِ سائلٍ دفين في موضعٍ ما في القطاع ذي التظليل المتعارض.

12- نستطيع الحصولَ على مزيدٍ من المعلومات المفصلة حول تكوينِ باطنِ الأرض، بإضافةِ المزيد من البيانات من زلازلَ متعددةٍ وقعتْ في أماكنَ مختلفةٍ من الأرض. وهنا، يولِّد زلزالٌ ثانٍ مجموعةً من القراءات على شبكةِ مقياسِ الزلازل تشير إلى إخفاقِ مقياسَيْن مختلفَيْن في رصْدِ

الموجة الثانوية. ويساعد جمْعُ البياناتِ من كلا الحدَثَيْن على تحديدِ موقعِ القطاع الموجود تحت الأرض الذي لا يسمح بانتشارِ موجاتِ القصّ عبْرَه.

أوضحنا في الشكل هذا الأسلوبَ بوصفه وسيلةً للعثورِ علـى السوائل، لكن فـي الإمكان استخدامه لإيجاد العديدِ من الخواصِّ الأخرى للتراكيب الموجودة في باطن الأرض.

وأيُّ خاصيةٍ مَوْضعية تستطيعُ أن تُغيِّرَ بعضَ المسارات الموجية دون غيرها يُمكِن تصويرُها بهذا الشكل. علـى سبيل المثـال، بمقدورنا العثورُ علـى كتلةٍ من مادةٍ ناعمةٍ مـا ذاتِ سرعةِ صوتٍ أبطأ - أيْ يتحرَّك الصوت عبْرَها بصورةٍ أبطأ - لأن أزمنةَ وصولِ الموجات إلى بعضِ أجهزةِ الرصْدِ ستكون متأخرةً عن الأزمنةِ المتوقَّعة وفقاً لما تُظهِرُه أجهزةُ الرصد الأخرى. وستَخلُص حينئذٍ إلى أن الكتلةَ الموضَّحة بالشكل البيضاوي فـي الشكل 12 لها تركيبٌ مختلِف عن الأجزاء المحيطة بها. وبمزيدٍ من التمحيص، يُمكِنك أن تحدِّدَ سرعةَ انتقال الصوت في هذه الكتلة، وربما تعرف ماهيةَ هذه المادة، اعتماداً على معرفتك المستقلة بسرعات الصوت في المواد المختلفة. إذَن، يتيح لنا هذا النوعُ من التحليل معرفةَ ما يتكون منه باطنُ الأرض، ما دام بمقدورنا جعْلُ الموجات تمرُّ عبْرَ هذه القِطاعات وتعودُ إلى السطح كي تُقاسَ وتُحَلَّل.

موجات على الشمس

لعلَّك لاحظتَ خلال وقوفك عند حافةِ مَسبحٍ في يومٍ مُشمِس، وأنت تستعدُّ للقفز، أن في قاع المسبح شبكةً متغيِّرة من الأنماط الساطعة والداكنة. وإذا كنتَ تميلُ إلى البحث عن تفسيرات، يصبح اكتشافُ مِن أين جاء هذا النمَطُ إحدى أولوياتك، وربما تدرك سريعاً أن النمطَ في قاع المسبح ناجمٌ عن ترقرُق الموجات المتقاطِعة فوق سطح الماء، والتي تتفاعل مع ضوء الشمس الساقط عليها من الأعلى وتغيِّره. في الأساس، تولِّد الكثافة المتغيرة للمياه أثناءَ تَشكُّل الموجات وتحرُّكها عبر السطح عدساتٍ صغيرةً تجمعُ الضوءَ وتركِّزه؛ مما يؤدي إلى تَكوُّن رُقعٍ ساطعة مُركزة على قاع المسبح في الأسفل. وإذا تساءَلتَ بعد ذلك عن مصدرِ هذه الترقرُقات والموجات، فمن المنطقي أن تَخلصَ إلى أن نوعاً ما من الاضطراب - الناتج ربما عن رياحٍ قوية أو عن حركةِ الناس داخل الماء - هو المسؤولُ عن توليدها. والانعكاساتُ من جانبَي المسبح تَجعلُ الموجاتِ ترتدُّ إلى الخلف والأمام، ويتفاعل بعضُها مع بعض، وتكوِّن الشبكةَ المعقَّدة من الترقرُقات المرئية على السطح.

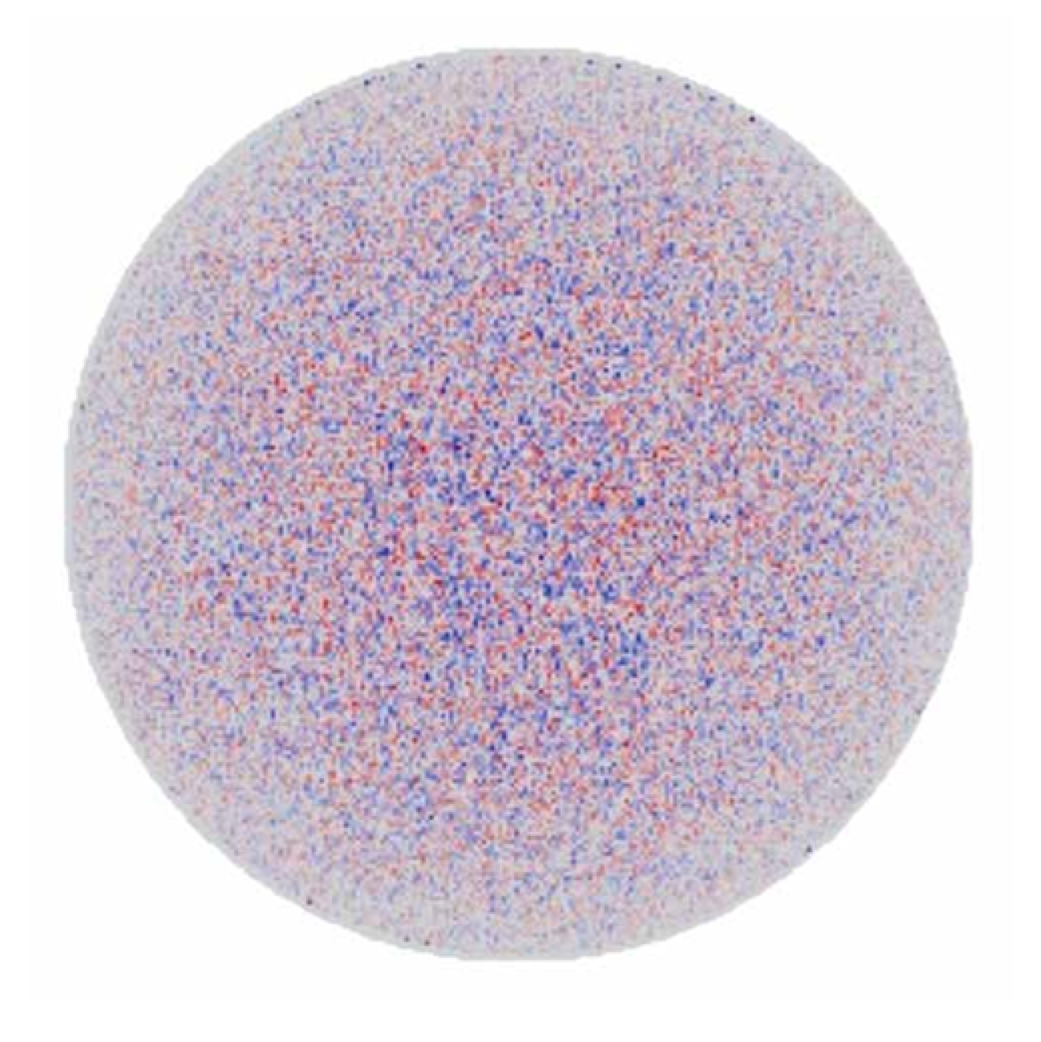
بالإضافة إلى الموجات المرئية على سطح الماء، هناك موجاتٌ صوتية تنتشر عبر الماء. وإذا كنتَ غوَّاص سكوبا scuba، فمن المؤكَّد أنك لاحظتَ أن الصوتَ ينتقل في الماء بشكلٍ جيد. ويُمكِنك ملاحظةُ هذا في حوضِ الاستحمامِ كذلك؛ فإذا أَمَلْتَ رأسَك للخلف بحيث يَغمرُ الماءُ أُذنَيْك (لكن لا يغمر وجهَك؛ لأنك بحاجةٍ إلى التنفُّس!) ثم خدَشتَ قاعَ الحوض بظفرِ إصبعك، فستسمعُ صوتَ

الخربشة بوضوحٍ تام. إن الموجاتِ الصوتيةَ موجاتٌ تضاغُطية، تنتقلُ في الماء مثلما تنتقلُ في الهواء، بل في حقيقةِ الأمر تنتقلُ هذه الموجات عبرَ الماء أسرعَ بخَمسِ مراتٍ تقريباً.

ونستطيع، من حيث المبدأ، رصْدَ الموجات الصوتية على سطح الماء عندما تصِلُه من الأسفل وتتسبَّب في اهتزازٍ محدودٍ للسطح أثناء ارتدادها عنه كي تعودَ مجدداً إلى قاع الماء. (قِيلَ إن الجواسيسَ استخدموا هذا التأثيرَ للتنصُّت على الحوارات في مبنى ما برصد اهتزازاتِ الألواح الزجاجية للحجرة عن بُعْد). يتمثلُ وجْهُ الصلةِ بين هذا الأمر وقِصتِنا عن الشمس في أنه منذ وقتٍ طويل، في ستينيات القرن العشرين، رُصِدَت اهتزازاتٌ مُماثِلة على سطح الشمس، ومن الممكن استخدامُها للاستماع إلى ما يحدث داخل الشمس.

وُلِد روبرت بي لايتون Robert B. Leighton في ديترويت عام 1919، ونشأ في وسطِ مدينة لوس أنجلوس بعد أن انتقلَ إلى هناك برفقةِ والدته. نال لايتون شهادةَ البكالوريوس في الهندسة الكهربائية من معهد كاليفورنيا للتقنية في عام 1941، ثم تحوَّلَ إلى دراسةِ الفيزياء ونال درجةَ الماجستير في العلوم في عام 1944، ثم الدكتوراه في عام 1947، كلتاهما من معهد كاليفورنيا للتقنية، ثم انضمَّ إلى هيئة التدريس بالمعهد في عام 1949.[7] وأمضى إجمالاً 58 عاماً في معهد كاليفورنيا للتقنية، أجرى خلالَها تجاربَ عبقريةً في فيزياءِ الجوامد، والفيزياءِ الفلكية، وفيزياءِ الجسيمات، وعِلم الفلك الراديوي، من بين العديد من المجالات الأخرى. وربما يكون أكثرُ شيءٍ أكسَبَه شُهرةً لدى العامة هو تدوينه محتوى محاضرات فاينمان عن الفيزياء من تسجيلاتِ هذه المحاضرات، وألَّفَ أيضاً مَرجِعاً فيزيائياً يُستخدَم على نطاقٍ واسع، بعنوان «مبادئ الفيزياء الحديثة» (Principles of Modern Physics). وتمثَّلَ أحدُ مجالات اهتمامه المتعددة في دراسة الشمس، التي استأنَفَ فيها دراساتِ جورج إليري هيل، وأحدثَتْ هذه الدراساتُ ثورةً في مجال الفيزياء الفلكية.

في عام 1959، ابتكَرَ لايتون الطريقةَ الحديثة لقياس المجالات المغناطيسية على الشمس. واستكمالاً لعملِ هيل وزميلٍ للايتون يُدعى هوراس بابكوك Horace Babcock، ابتكر لايتون طريقةً لإجراءِ قياساتٍ سريعة للغاية لقِطاعاتٍ شاسعةٍ من الشمس، باستخدامِ إجراءٍ نطلق عليه الآن «تصوير الاختلاف»؛ وهو أداةٌ مفيدة للغاية وشديدةُ الحساسية لإبرازِ مَواضعَ داخل الصورة تختلف عما حولها، عن طريق أخْذِ أزواجٍ من الصور وطرح مكونات واحدةٍ من الأخرى، وبهذا تتبقَّى صورةٌ توضِّح أين يَكمُن الاختلافُ بين الصورتَيْن الأصليتَيْن، ومدى ضخامةِ الاختلاف. في عصرنا الرقمي، يُمكِن إجراءُ هذا بواسطةِ الحاسوب، ولكن قبل العقود الأخيرة من القرن العشرين تعيَّنَ القيامُ بهذا باستخدامِ طرائق فوتوغرافية طويلة ودقيقة ومُنهِكة إلى حدٍّ ما.

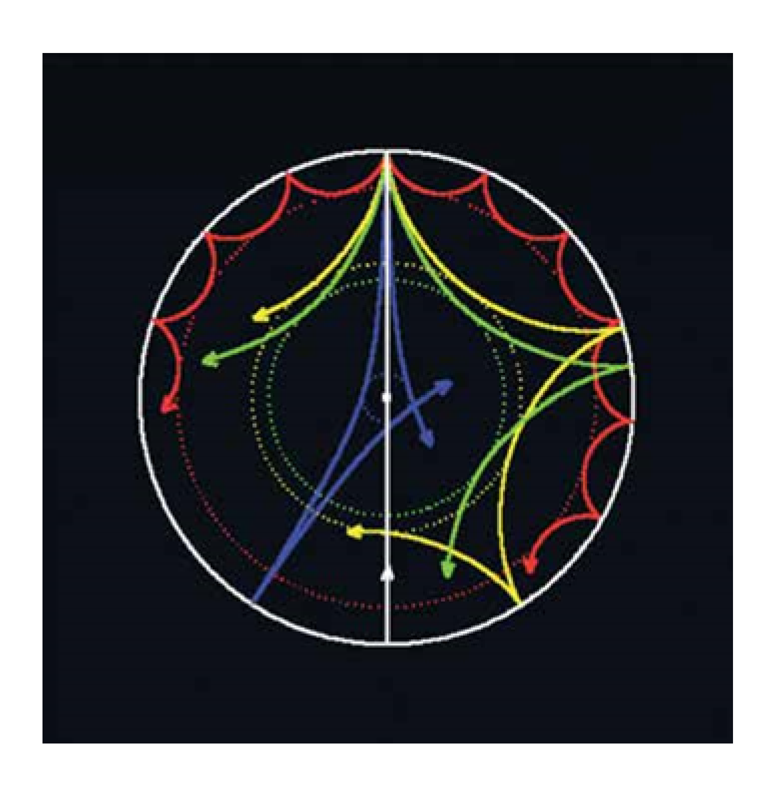


13- توضِّح هذه الصورةُ دوبلرغراماً Dopplergram حديثاً (خريطةَ سرعة) مأخوذاً من مجموعةِ الشبكة العالمية للتذبذُب. تتذبذبُ بُقعٌ صغيرة من سطح الشمس لأعلى وأسفل على فتراتٍ مِقدارُها نحو خمسِ دقائق، وهذه الحركاتُ المتجهة نحوَ الراصد أو بعيداً عنه مُوضَّحةٌ هنا في صورةِ بُقعٍ زرقاءَ أو حمراءَ على الترتيب.

وتُحوَّلُ الصورةُ عادةً إلى صورة سلبية (نيجاتيف) عن طريقِ التصوير التلامُسي (تعريض فيلمٍ شفَّاف موضوعٍ مباشَرةً فوق صورةٍ شفَّافة خاوية)، بعد ذلك تُوضَع الصورةُ الثانية فوق النيجاتيف وتُطبَعان كلتاهما. وإذا أُجريَت هذه المهمة بدقةٍ تكون الصورةُ المتولِّدةُ رماديةَ اللون في الموقع الذي تتطابقُ فيه الصورتان، وتكونُ إمَّا ساطعةً وإمَّا داكنةً في مَوضعِ وجودِ اختلافٍ بالصورة الثانية بالنسبةِ إلى الأولى؛ إذ تكون ساطعةً في مَواضعِ الزيادة، وداكنةً في مَواضعِ النقصان.

باستخدامِ هذه الطريقة، لـم يصبح فـي الإمكان دراسةَ المناطقِ المغناطيسية القوية داخلَ البُقَع الشمسية فقط، وإنما دراسةُ منطقةِ النشاط الكاملة المحيطة بالبُقَع الشمسية أيضاً، والتي تتسبَّب فيها إزاحاتُ الأطوال الموجية الناتجة عـن وجود المجالات المغناطيسية فـي تغييرِ سطوعِ الصورة في الأماكن التي يوجد فيها المجال. علاوةً على ذلك، أدرَكَ لايتون أنَّ من الممكـن اسـتخدامَ التقنية نفسها لقياسِ الحركات على السطح المرئـي للشمس، عن طريقِ التغيُّرات الصغيرة فـي الطول الموجي المعروفة باسم إزاحات دوبلر. في هذه الحالة، تَنتج إزاحاتُ الطولِ الموجي عن حركاتٍ تتَّجِه نحوَ الراصد أو بعيداً عنه، وليس عن وجودِ مجالٍ مغناطيسي، لكن تقنيةَ تصويرِ الاختلاف تنطبقُ فقط على كلِّ موقفٍ على حِدة؛ فهي مجردُ طريقةٍ نفسِّر بها صورَ الاختلافات الناتجة المتباينة، وفـي إحدى الحالات تُظهِر قوة المجال المغناطيسي، وفي الأخرى تُظهِر ما إذا كانت السرعةُ تتجه نحوَ الراصدِ أم بعيداً عنه.

باستخدامِ هذه التقنية، اكتشف لايتون وتلميذاه روبرت نويس Robert Noyes وجورج سايمون George Simon أنَّ ثَمةَ خلايا كبيرةً مكوَّنةً من مادةٍ تتحرَّك أفقياً تغطِّي سطحَ الشمس، مع تحرُّك المادة إلى الأعلى في مراكز الخلايا، وأفقياً من المركز إلى الخارج عبر المنطقة الرئيسة للخلية، وإلـى الأسـفل عنـد الحوافّ.



14- الموجات الأولية، المسمَّاة كذلك بالموجاتِ الانضغاطية أو السَّمْعية، التي تنتقل داخلَ الشمس من الممكن حصْرُها في منطقةٍ يحدُّها من الأعلى انخفاضٌ كبير في الكثافة قُربَ سطح الشمس، ومن الأسفل زيادةٌ في سرعةِ الصوت تَكسرُ أيَّ موجةٍ متجهة للأسفل وتُعِيدها مجدداً نحو السطح. تعود الموجات إلى السطح حيث يُمكِن أن تُرصَدَ وتُحلَّلَ للكشف عن معلوماتٍ حول باطن الشمس حيث مرَّتِ الموجات. وكما يوضِّح الشكل، تخترقُ الموجاتُ ذاتُ الطول الموجي الأطول عُمقاً أكبر، وهذه هي الموجاتُ ذاتُ الفتراتِ الطويلة والتردُّدِ المنخفض. وإذا أرَدْنا معرفةَ الظروف الموجودة في أعماق الشمس، فعلينا أن نرصدَ هذه الموجات، ويتطلَّبُ هذا مُشاهَداتٍ طويلةً للغاية غيرَ مُنقطِعةٍ، إمَّا من الفضاء (تفاعُل إنساني حاسوبي) وإمَّا من شبكةٍ عالمية من مَحطاتِ الرصد الأرضية، تُعرَف باسم مجموعة الشبكة العالمية للتذبذب

.(Global Oscillation Network Group (GONG

واكتُشِف أن سطحَ الشمس مُغطى بهذه الخلايا الكبيرة، وأن المجالاتِ المغناطيسية المَقِيسة على سطح الشمس تشكَّلتْ في نمطٍ خلوي، وتوجد المجالاتُ في الغالب على الحوافِّ الخارجية للخلايا. علاوةً على ذلك، اكتشفَ هؤلاء الباحثون حركاتٍ اهتزازيةً رأسيةً واسعةَ الانتشار (موجات) تغطي سطح الشمس، في نمطٍ صغيرِ النطاق تَبلغُ مُدته في المتوسط 300 ثانية. سُمِّيت الخلايا الواسعةُ النطاق «الحُبَيْباتِ الفائقةَ»، وهي تُمثِّل نسخةً أكبر من الحُبَيْباتِ المعروفة الصغيرةِ النطاق التي رأيناها خارجَ البُقَع الشمسية في صورٍ كتلك الواردة في الشكل 2. وقد وُجِد أن النمطَ الصغير النطاق، المسمَّى «اهتزازات الدقائق الخَمْس» بسببِ مُدته البالغة 300 ثانية، ذو علاقةٍ وثيقةٍ بالتحبُّب.

ما لم يَعرفْه أحدٌ حتى ذاك الحينِ هو أن تلك كانت بدايةَ مجالٍ دراسي جديد؛ ألا وهو «عِلم الرجفات الشمسية» helioseismology، من شأنه أن يُمكِّنَنا من رؤيةِ ما يوجد داخلَ الشمس. فهذه الموجاتِ الموجودةَ على سطح الشمس يُمكِنها أن تؤدِّيَ وظيفة مصفوفة من مقاييسِ الزلازل، وتساعدنا على قياس الموجات التي بَلغتِ السطحَ عن طريقِ الانتقال عبر الشمس.

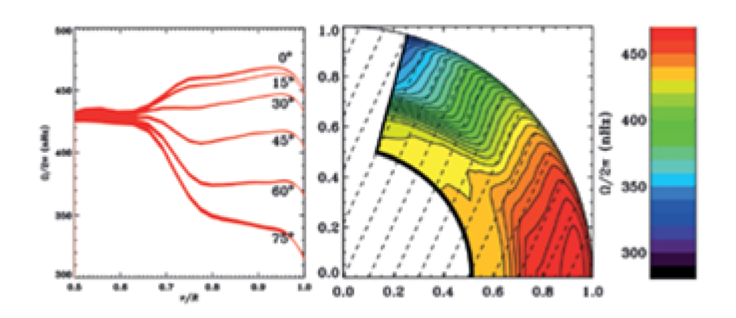
موجات داخل الشمس

يشتهر يوهانس كبلر 1630 -1571) Johannes Kepler) بالقوانين الثلاثة التي وضعها للحركة الكوكبية، والقائمة على تحليلِ مُشاهَدات تيخو براهي Tycho Brahe الدقيقة التي حسَّنَتِ النموذجَ الكوبرنيكي القائمَ حينذاك منذ عقود، وأثبتَتْ أن الكواكبَ تدور حول الشمس في مدارات إهليلجية (بيضاوية)، وليس في دوائر منتظمة، مع وجودِ الشمس في مركزِ المدار الإهليلجي لكل كوكب. أراد كبلر أيضاً أن تكونَ المُشاهَداتُ المستخدَمة في حساباته دقيقةً قَدْرَ الإمكان، وتفحَّصَ العديدَ من الأمور، من بينها أخطاءُ الرصد الناجمة عن انكسارِ الضوء من جِرْمٍ فلكي بعيد أثناءَ عبورِ الضوء الغلافَ الجوي للأرض في طريقه إلى الراصد. وركَّزَ تحديداً على مُشاهَدات الأجرام القريبة من الأُفق؛ إذ يكون التأثيرُ في أقوى صُوَره، وأنتَجَ قياساتٍ تفصيليةً

للمواقع المتوقّعة في مقابلِ المواقع المرصودة (وكان قابَ قوسَيْن أو أدنى من استنتاجِ قانونِ الجيب للانكسار). سببُ الانكسار هو أن سرعةَ انتشار الموجة تتغيَّرُ أثناءَ حركتها عبر الوسط. وسواء أكُنَّا بصددِ انتشارِ موجاتٍ صوتية أم ضوئية، فالمبدأ واحدٌ؛ إذ ينحرفُ الاضطرابُ بعيداً عن أجزاءِ الوسط التي ينتشر فيها بصورةٍ أسرع، وفي اتجاهِ الأجزاء التي ينتشر فيها بصورةٍ أبطأ.[8] إن انكسار الضوء أثناءَ مرورِه خلال وسَطٍ كثيفٍ وثيقُ الصلة بدراسةِ باطن الشمس؛ لأنه يتيح لنا فرصةَ ربْطِ الموجات المنتقلة داخل الشمس بالموجات المرصودة على السطح.

رنينٌ كالجرس

بعدَ مُضِي سنواتٍ قليلة على رصدِ اهتزازاتِ الدقائق الخمس والحُبَيْبات الفائقة، أثبَتَ روجر أولريش Roger Ulrich، وكلٌّ من جون ليباكر John Leibacher وروبرت شتاين Robert Stein بشكلٍ مستقل، أن حركاتِ السطح كانت جزءاً من شبكةٍ من الموجات الأكثر شمولاً، تغطِّي السطح وتخترق الشمسَ بعُمْق. ومن بين الأنواع المختلفة من الموجات التي يُمكِن أن توجدَ داخلَ الشمس، فإن النوعَ الرئيس من الموجات الذي رُصِد بالفعل هو موجةٌ صوتية، طولية أو انضغاطية، تُسمى «الطور p». ويُمكِن لهذه الموجات أن تتحرَّكَ في جميع الاتجاهات داخلَ الشمس، لكن الموجات التي تصل إلى القمة، أو الغِلاف الضوئي، ترتدُّ مجدداً إلى الأسفل بسببِ الهبوط الحادِّ المفاجئ في الكثافة عند هذا التُّخْم. والموجاتُ التي تتحرَّك إلى الأسفل تجد نفسَها تتحرَّك عبرَ وسطٍ ذي سرعةِ صوتٍ متغيرة؛ إذ يزداد الضغطُ والكثافةُ في اتجاهِ الأجزاء الداخلية من الشمس، مما يسبِّب زيادةَ سرعةِ الصوت.



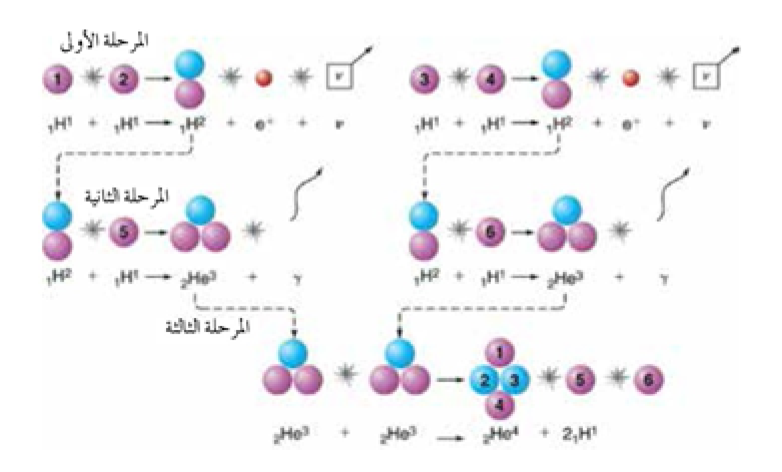
15- من أكبر الانتصارات المبكرة التي حقَّقها عِلم الرجفات الشمسية تحديدُ حركاتِ المائع داخلَ الشمس. يصوِّر الشكلان الموضَّحان هنا النتيجةَ نفسها، والمعروضةَ بطريقتَيْن مختلفتَيْن: يدور خطُّ الاستواء الشمسي بسرعةٍ أكبرَ من السرعة التي يدور بها القطبان، ويدور الجزءُ الداخلي للشمس بسرعةٍ. يوضِّح الشكلُ الأيسر الدورانَ عند دوائرِ عرضٍ مختارة، موضحة من منتصفِ الطريق

ثُم إلى الأسفل صَوْبَ مركزِ الشمس (0.5r/R) خروجاً إلى السطح. ويشير المقياسُ الرأسي إلى معدلِ الدوران. لخط الاستواء، عند 0o، أعلى معدلِ دورانٍ، في حين يكونُ المعدلُ أبطأ بالتتابُع عند دوائر العرض مع التحرُّك تجاهَ القطبَيْن (45o، 30o، 15o ... إلخ). وأثناء التحرُّك إلى الداخل (إلى اليسار في هذا الشكل)، تجتمع معدلاتُ الدوران كلُّها معاً، لتلتقيَ بَعدَ السطح على مسافةِ 35% تقريباً من الجزء الداخلي، بحيث تدور جميعُ دوائرِ العرض بالمعدل ذاته. وفي العُمقِ الداخلي للشمس، توجد منطقةُ لُبٍّ كروية لا تدور تَفاضُلياً على الإطلاق، وإنما تبدو على الأرجح وكأنها كرةٌ جاسئة. ويوضِّح الشكل الأيمن هذه النتيجةَ نفْسَها والمبيَّنة بتخطيطاتٍ لونية، ويمثِّل اللونُ الأحمر الدورانَ الأسرع، والأزرقُ يُمثل الدورانَ الأبطأ. ويُعتقَد أن الوسَط الذي بين الدوران التفاضُلي ودوران الجسم الجاسئ هو المَوْضعُ الذي تتولَّد فيه أقوى المجالات المغناطيسية. وتختفي اختلافاتُ اللون عند بلوغِ عُمْقٍ يتجاوز 0.7r/R، إذ تتحوَّل جميعُ الألوانِ إلى اللون الأصفر والذهبي، وهو ما يشير إلى أن جميعَ الأجزاء تدور بالسرعة ذاتها تقريباً.

والموجاتُ المتحرِّكة إلى الداخل تنحرف بعيداً عن المنطقةِ ذاتِ سرعةِ الصوت العالية، ومن ثَم فإنها تنكسر في هذه الحالة إلى الأعلى، لترتدَّ خارجةً من النطاق الداخلي للشمس وفي اتجاه السطح (الشكل 14). وتتفاعل الموجات المتحركة إلى الأسفل والأعلى مع بعضها، وهو ما يؤدِّي إلى توليدِ رنينٍ يسمح فقط لتردُّداتٍ متقطِّعةٍ محدَّدة بالبقاء، كما يحدث في الوتَر المهتزّ أو الجرس الرنَّان. وعلى السطح، نستطيعُ رصْدَ الموجات التي انتقلت إلى داخل الشمس وخرجت مجدداً، ومُقارَنتَها بالموجات التي لم تَقطَعْ هذه الرحلةَ ذهاباً وإياباً.

توجد موجاتٌ ذاتُ ملايينِ التردُّدات المختلفة، ويهيمن عليها طيفٌ متمركز تقريباً على تردُّدٍ مِقدارُه خَمسُ دقائق. وترصد الصورةُ الجميلة المعروضة في بدايةِ هذا الفصل واحداً من هذه الأطوار الموجية. ويتبيَّنُ أن اهتزازاتِ الدقائق الخمس هي التجسيدُ السطحي للأطوار الموجية المنتقلة عبر الشمس. وبإجراءِ بعض التحليلات البارعة، يُمكِن استخدامُ الاهتزازات المتضخِّمة المرئية على السطح للكشفِ عمَّا شهِدَتْه الموجاتُ العائدة أثناءَ رحلتها عبرَ باطنِ الشمس، بالطريقة نفسها التي كشف بها تحليلُ أولدهام للموجاتِ الزلزالية الناتجةِ عن الزلازل التي ضربت الهند تفاصيلَ حول باطن الأرض.

من أهم النتائج التي استخلصناها من هذا التحليل بيانُ الطريقةِ التي يستمرُّ بها الدوران التفاضُلي للشمس - الدوران الأسرع لخط الاستواء مُقارَنةً بالقُطْبَيْن - حتى أعماق الشمس. وهذا الدورانُ التفاضُلي يوجد فقط في الثُّلثِ الخارجي من الشمس، وهو المنطقةُ المعروفة باسمِ منطقة الحَمْل الحراري. وأسفلَ منطقةِ الحَمل الحراري هذه وُجِد أنَّ للشمس لُباً، كذلك الموجودِ في الأرض، وبَعدَ 30% تقريباً من المسافة نحوَ المركزِ ينتهي الدوران التفاضُلي، وفيما بعدَ هذه المسافة وُجِد أن الشمسَ تدور كما لو كانت جسماً جاسئاً، بحيث تدورُ جميعُ الأجزاء معاً. هذا التغيُّرُ في نمطِ الدوران مُوضَّحٌ في التمثيل البياني الوارد في الشكل 15؛ إذ إن مُنْحنياتِ الدوران لدوائرِ العرض المختلفة مُتباعدةٌ للغاية بالقرب من السطح، لكنها تجتمعُ معاً عند نصفِ قُطْرٍ داخلي يبلغ نحو 65% من نصف القُطْر الخارجي.

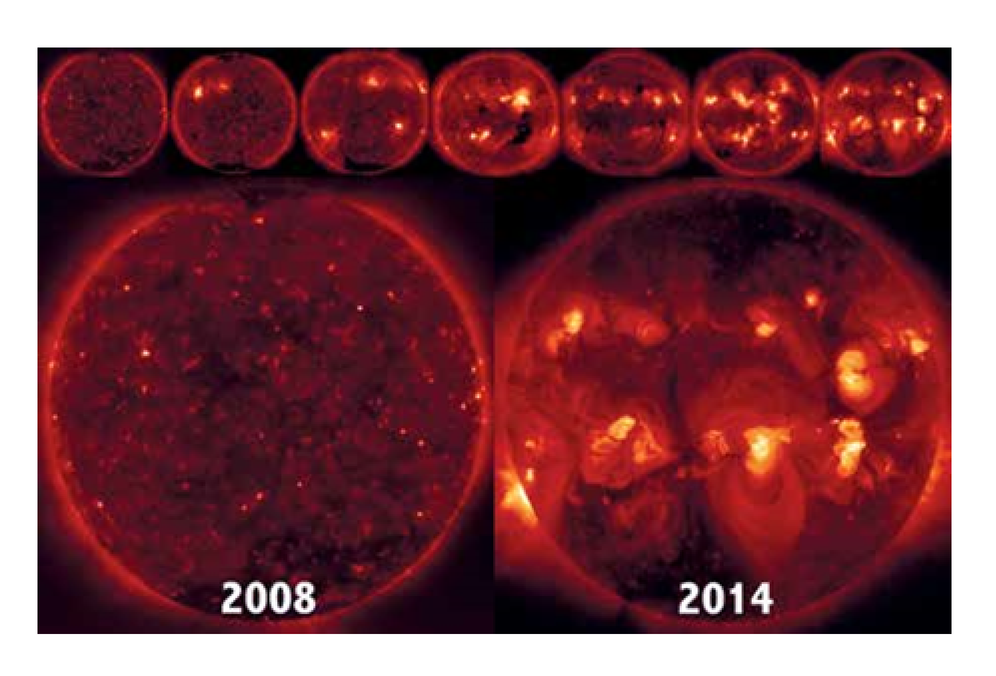


16- في العُمْق الداخلي للشمس تندمج ذراتُ الهيدروجين (البروتونات الموضَّحة هنا باللون الأحمر) معاً في درجةِ الحرارة والكثافةِ الشديدتَيْن في لُب الشمسِ لتكوينِ العنصر الأثقل التالي، وهو الهيليوم، عبر سلسلةٍ من الخطوات، يتضمن العديدُ منها تحلُّلَ البروتون إلى نيوترون (موضَّح هنا باللون الأزرق) مع تحرُّرِ إلكترون ونيوترينو. يشير الرمز V إلى النيوترينو، والرمز γ إلى الضوء ذي الطول الموجي القصير المعروفِ باسمِ أشعة غاما.

وبما أن ذلك يحدث عند تَخْمٍ شديدِ الحِدة، يوجد تغيُّرٌ كبير في معدلِ الدوران في طبقةٍ رقيقة داخل الشمس، كما هو موضَّح في التخطيطات المتقارِبة شبهِ الأفقية بالمنطقة الصفراء- الذهبية في الجانب الأيمن من الشكل. وستلعبُ طبقةُ القَص هذه، كما تُسمى، دوراً جوهرياً في نقاشِنا التالي الذي يدور حولَ توليدِ مجالاتٍ مغناطيسية قوية في الأعماق الداخلية للشمس وجيشانها إلى السطح، بحيث تُولد البُقَع الشمسية ومجموعة أخرى من الظواهرِ ذاتِ الصلة.

لعِبَ عِلمُ الرجفات الشمسية دوراً أيضاً في المساعدة على حلّ «مشكلةِ النيوترينوات الشمسية» التي ظلت قائمةً لوقتٍ طويل. ففي عُمْق لُب الشمس، تكونُ درجةُ الحرارة شديدةَ الارتفاع؛ لدرجة أن ذراتِ الهيدروجين - البروتونات - يصطدم بعضُها ببعضٍ بسرعاتٍ عالية جداً، وهو ما يؤدِّي إلى اقتراب بعضها من بعض بصورةٍ كافية بحيث تتمكَّن من الالتحامِ وتكوينِ عنصرٍ أثقلَ، وذلك على الرغم من أن لها الشِّحْنة الكهربية نفْسها؛ ومن ثَم تنزع إلى التنافُر. ويوضِّح الشكل 16 سلسلةً من هذه التفاعلات، تُعرَف باسمِ تفاعُل بروتون- بروتون المتسلسِل، ويُنتِج هذا النوعُ من التصادُمات العاليةِ السرعة سلسلةً من النوى الأثقل تبدأ من الهيدروجين، ذي البروتون الواحد، إلى الهيليوم ذي النَّوَيات (النيوكليونات) الأربع؛ بروتونَيْن ونيوترونَيْن. وفي جزءٍ من هذه السلسلة من التفاعُلات تُقذَف النيوترينوات وتشقُّ طريقَها خارجةً من الشمس؛ مما يَسمَح لنا برصْدِها من الأرض. وظلت المشكلةُ المتمثِّلة في رصدِ زُهاء ثلثِ النيوترينوات فقط قائمةً بالرغم من سنواتٍ من الجهد المبذول للعثور على تفسير.

إن تجــارِبَ النيوتـرينـو معروفــةٌ بصـعوبتهـا الكبيــرة لأن النيوترينوات تتفاعل تفاعلاً ضعيفاً مع المادة العادية؛ لذا فإن أولَ مكانٍ توجَّهتْ إليه الأنظار للبحث عن تفسيرٍ كان التجرِبةَ ذاتَها. وأشار هذا النَّهْج، الذي يتضمَّن فحصاً مفصَّلاً للطريقة المتبعة، وكذلك تصميم تجارب أخرى باستخدام طرائـق مختلفة، إلَّا أن الحلَّ يَكمُن فـي موضعٍ آخَر. وتضمَّنتْ فئةٌ أخرى من التجارب تغييرَ نماذجِ البِنْية الداخلية للشمس بحيث تولِّد قدراً أقلَّ من النيوترينوات. لكن لم تَنجح أيٌّ من هذه المُحاوَلات؛ وذلك لأنه لم يكُنْ في مقدورِ أحدٍ تغييرُ النماذج بما فيه الكفاية لتبريرِ هذا الفارق، بالإضافة إلـى تأكيدِ عِلم الرجفات الشمسية بنيةَ درجة الحرارة الداخلية للشمس. وعليه، أكَّدتْ المؤشراتُ وجـودَ حاجةٍ ماسَّة إلى تغييرِ فَهْمِنا لفيزياء النيوترينوات، ولجأ الباحثون إلـى اقتراحٍ طرحه برونو بونتيكورفو Bruno Pontecorvo فـي عام 1957 أشار إلى أن من المفترضِ وجودَ ثلاثةِ أنواعٍ من النيوترينوات، وإذا لم تكُن النيوترينوات جسيماتٍ عديمةَ الكتلة مثل الفوتونات، لكن لها كتلة صغيرة، فلا بد إذَن مِن أن يتحوَّلَ بعضها تلقائياً إلى بعضٍ بشكلٍ اهتزازي. ومن ثَمَّ، فإن النيوترينوات الشمسية، التي تبدأ بالنوع المعروف باسمِ نيوترينوات الإلكترون، تتحوَّل إلى الأنواع الثلاثة جميعها في طريقها إلى الأرض.[9] لكن التجارِبَ المبدئية رصدتْ نيوترينوات الإلكترون فقط، ومن ثَمَّ فقد رصدتْ ثُلثَ العددِ الإجمالي للنيوترينوات فقط! وصُمِّمت تجارِبُ تاليةٌ سمحتْ باختبارِ هذه الفكرةِ، وتبيَّنَ أنها التفسيرُ الصحيح بالفعل.



17- بلغتِ الدورةُ الشمسية الأحدث، الرابعةُ والعشرون منذ بدْءِ رصد البُقَع الشمسية بجديةٍ في عام 1755، ذروتَها في نهاية عام 2014 وأوائل عام 2015، ثم دخلتْ طورَ التناقُص. في الأعلى،

توجد صورة لكل واحد من العامَيْن الّتَقطها تلسكوبُ الأشعة السينية هاينود Hinode X- ray Telescope، بدءاً من عام 2008، بعدَ دورةِ الشمس الدُّنيا مباشَرةً، ويميِّزها ظهورُ البُقَعِ الشمسية ذاتِ القطبيةِ المعكوسة في دوائرِ العرض العليا للدورة الجديدة. وتتَّسِم الدورةُ الرابعَة والعشرون بأنها الأقلُّ نشاطاً منذ فَجرِ عصرِ الفضاء، والأقلُّ في عدد البُقَع الشمسية خلال قرنٍ كامل.

الفصل الثالث
نبضة شمسية

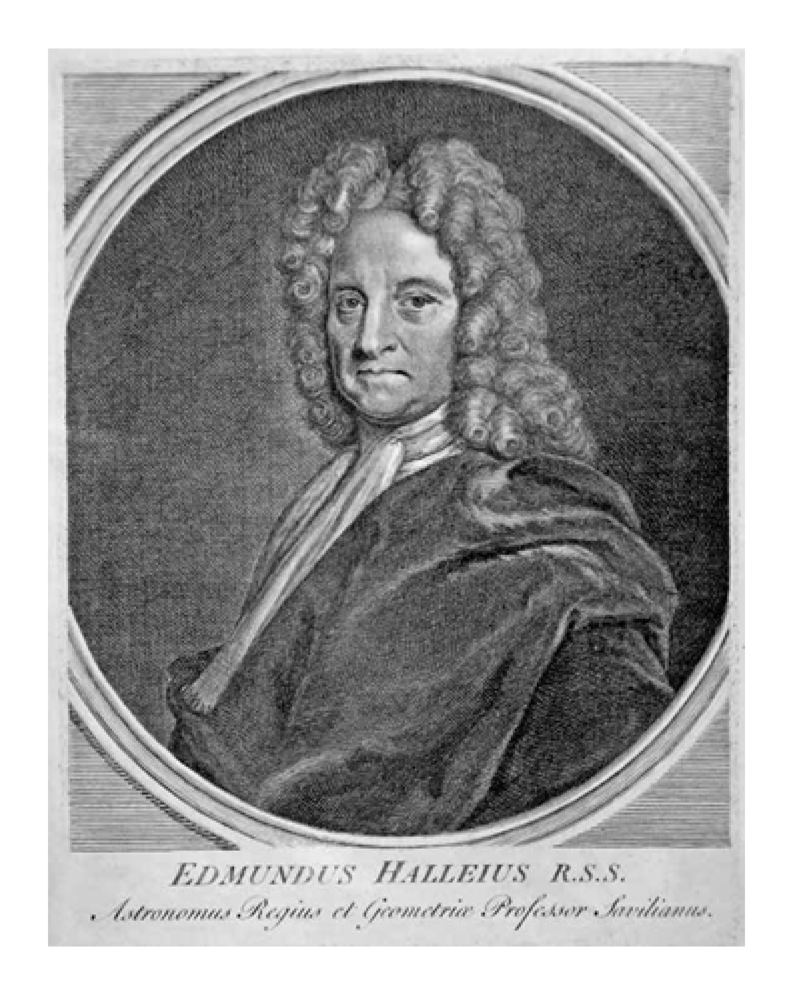
قدَّمَ وليام جيلبرت، في كتاب «عن المغناطيس»، تفسيراً للمجال المغناطيسي لكوكب الأرض يفيد بأن الأرضَ ذاتها عبارةٌ عن حجرِ مغناطيسٍ عملاق. ومن أجل تأكيد فكرته، تضمَّنَ العنوانُ الكامل لكتابه الشهير عبارةَ «عن الأرض، المغناطيس الكبير». كانت هذه الفكرةُ مقبولةً، استناداً إلى المعلوماتِ المتوافرة حينذاك عن المغناطيس، وحاوَلَ جيلبرت إثباتَ صحةِ فكرته عن طريق نحْتِ حجر مغناطيس كبير على شكل كرة. وهذا النموذج للأرض، الذي سمَّاه terella، حاكى السلوكَ المعروف لإبرة البوصلة أثناءَ تحركِها عبر السطح، ويشمل ذلك خاصيةَ الإشارة نحوَ الشمال المغناطيسي، وخاصيةً أخرى أشدَّ غموضاً؛ ألا وهي انحرافُ الإبرة عن المستوى الأفقي عند دوائرِ عرضٍ مختلفة على الكرة الأرضية.

للأسف، لم تَدُمْ هذه النظريةُ الأنيقة التي وضَعَها جيلبرت إلا لجيلٍ واحد فقط. تنبَّأ نموذجُه بأن المجالَ المغناطيسي للأرض ثابتٌ ودائمٌ وغيرُ متغيِّر؛ ومن هنا جاءت تسميةُ المغناطيس الدائم. وكان معروفاً في الوقت الذي عاش فيه جيلبرت أن البوصلةَ تشير إلى اتجاهٍ مختلِفٍ منحرفٍ عن الشمال الفعلي. وكان هذا الاختلاف، الذي يُدعى الانحراف، يُخطَّط ويُرسَم حتى يتسنَّى للبحَّارة القيامُ بالتصحيحات اللازمة، وربما فُسِّرَ في نموذج جيلبرت بأن المجال المغناطيسي الداخلي للأرض منحرفٌ نسبةً إلى محورِ دوران الأرض. لكن في عام 1635، نشَرَ عالِمُ الرياضيات اللندني هنري جيليبراند Henry Gellibrand كتاباً بعنوان «محاضرة رياضية عن انحراف الإبرة المغناطيسية وتناقصه الواضح المُكتشَف حديثاً» (*A Discourse Mathematical of the Variation of the Magneticall Needle Together with its Admirable Diminution Lately Discovered*). وأزاح بحثُه هذا الستارَ عن اكتشافٍ مثير للدهشة؛ وهو أن اتجاهَ الشمال المغناطيسي، كما يُرى من منطقةِ لندن، يتحرَّك، بل ويتحرك بسرعةٍ كبيرة أيضاً لدرجةِ أنه يُولِّد تغيراً واضحاً قابلاً للقياس في فترةٍ لا تتعدَّى بضعةَ عقود.



18 - ينحرف اتجاهُ الشمال المغناطيسي المَقِيس في أي مكانٍ على سطح الأرض بمرور الوقت. وتسارَعتْ هذه الحركةُ الانحرافية مؤخراً، مع تحرُّكِ الشمال المغناطيسي بمعدل 15 كيلومتراً لكل سنةٍ مؤخراً، عبرَ الممر الشمالي الغربي لكندا. واصَلَ الشمالُ المغناطيسي الانحرافَ ناحيةَ القُطبِ الشمالي لمحور الأرض، بالرغم من أنه منذ تاريخ تحديدِ النقطة الأكثر انحرافاً ناحيةَ الشمال الموضَّحة هنا، لم يُحَدَّد الموقعُ بواسطةِ بعثاتٍ ميدانية.

يعرض الشكل 18 مُلخَّصاً حديثاً للبيانات المغناطيسية، ويُظهِر بوضوح الانحرافَ الشاذ بعضَ الشيء، لكنه دائم، لاتجاه الشمال. وإذا لم يكُنْ المغناطيس الثابت داخلَ الأرض يدورُ بطريقةٍ ما، فسيكون من الصعب للغاية تفسيرُ هذه القياسات.



19 - إدموند هالي، نحو عام 1721، الصورةُ مأخوذة من لوحتِه الفلكية.

اقترَحَ عالِمُ الرياضيات والفلكي الملكي الشهير إدموند هالي Edmond Halley نموذجاً مشابهاً. وابتكر نموذجاً يحتوي فيه الجزءُ الداخلي من الأرض على قشورٍ مُمغنطةٍ كروية، تتحرَّك بشكلٍ مختلف قليلاً بالطريقة الصحيحة كي تولِّدَ الانحرافَ المرصود في المجال المغناطيسي للأرض. كان هالي فخوراً للغاية بهذا النموذج (غير الصحيح)، حتى إنه في اللوحة الرسمية التي رُسِمت له عند بلوغه الثمانين من عمره، اختار أن يحملَ رسماً لهذا النموذجِ في يده. وانقضى قرنان كاملان حتى ظهرتِ النظريةُ الحديثة التي تفسِّر كيف تتولَّد المجالاتُ المغناطيسية داخلَ الأرض، والتي طُبِّقت بعد ذلك على الكواكب الأخرى وعلى الشمس.

دورات على سطح الشمس

لا يمثل التعقيدُ المذهل للبُقَع الشمسية، وتأثيرُها على المناطق المحيطة بها وعلى الأرض، ونموها وتطوُّرها واختفاؤها، إلا جزءاً صغيراً من قِصتها. ولقد تسبَّبَ الاختفاءُ شبهُ الكامل للبُقَع الشمسية

لنحوِ قرنٍ من الزمن، تزامُناً مـع الوقـت الذي بدأتْ تخضع فيه للدراسة، في تأخيرِ اكتشافِ حقيقةٍ بالغةِ الأهمية بشأنها.

فـي عام 1826 فـي مدينة ديساو الألمانية، الواقعة على بُعْد 50 كيلومتراً شمالَ لايبزيغ، قرَّرَ عالِمُ فلكٍ هاوٍ يُدعى هاينريش شوابHeinrich Schwabe أن يسجِّلَ ويدرسَ البُقَع الموجودة على الشمس. لا أحدَ يعلم علـى وجهِ التحديد لماذا فعل هذا، بالرغم مما أُشِيعَ عن أنه كان يبحث عن كوكبٍ داخلـي أقرب إلـى الشمس مـن عُطارِد.[10] وتمثَّلَ النَّهْجُ الذي استخدمه شواب فـي البحث عن عبور الكوكب أمام قرص الشمس، ذلك الوقت الذي يوجـد فيـه الكوكبُ بين الأرض والشمس، بحيـث يبدو أشبهَ ببقعةٍ داكنة صغيرة تَعبُر أمامَ قُرص الشمـس. ومن أجلِ رصْدِ الكوكب بهذه الطريقة، لا بدَّ أن يستبعِدَ المرءُ كلَّ النقاطِ الداكنة التي لا تُعَد كواكبَ عابرةً؛ أي البُقَع الشمسية. وبغضِّ النظرِ عن دوافعِ شواب، فقد أجرى مُشاهَداتٍ منتظمةً للشمس، يوماً بعد يوم، وعاماً بعد عام، مسجِّلاً عددَ جميعِ البُقَع المرئية ومواقعَها.

لم يَعثُر شواب قَطُّ على كوكبٍ داخلي. وفي الواقع، استمرَّ البحثُ عن فولكان Vulcan، وهو الاسمُ الذي أُطلِق على هذا الكوكب، طوالَ خمسين عاماً أخرى، وشارَكَ في عمليةِ البحث العديدُ من أشهرِ علماء الفلك في ذاك العصر قبل أن تُنبَذَ الفكرةُ في النهاية. لكن شواب نجَحَ في جمْعِ سجلٍّ طويلٍ ومُفصَّل للبُقَع الشمسية، واكتشف أنها تَظهر وتختفي في نمطٍ دوري منتظم. وأثناءَ تقليدِ شواب وسام الجمعية الفلكية الملكية في عام 1857، أدلى الرئيسُ إم جيه جونسون M. J. Johnson بالتعليق التالي:

كان ذلك في عام 1826، عندما انخرَطَ في هذه الأبحاثِ التي تلفتُ انتباهَنا الآن إليها ... [لكنه] انتظر حتى عام 1843، عندمـا اجتاز دورتَيْن، دُنيا وعُظمى، كـي يُعلِنَ بكلِّ تواضُـع أن مُشاهَداته حتى ذلك الحـين كشفتْ عن وجودِ نمطٍ دوري أكَّدتْ وجودَه النتائجُ التي تم التوصُّل إليها ذاك العام. ومع ذلك، لم يَجذبِ الموضوعُ حينَها كثيراً من الاهتمام ... فأخذ يجمعُ أدلةً جديدة حولَ اكتشافه العظيم الذي ترَكَ بحَداثتِه وإبداعه بَصْمةً كبيرة على العالَم عندما أعلن عنه ألكسندر فون هومبولت Alexander Von Humboldt عامَ 1851 في المجلد الثالث من مَلْحمته الخالدة «الكون» (Cosmos)، بالرغم من أن هذا السرَّ كان قد كُشِف قبل ثماني سنوات.

وبعد إبدائه ملاحظةً مُفادُها أن التأثيراتِ الأرضيةَ الأخرى، مثلَ مدى ضخامة الاضطرابات المغناطيسية، تتفاوتُ من حيث الطَّوْر تَبَعاً لعددِ البُقَع الشمسية؛ اختتم جونسون حديثَه بوصفِ ما نُطلِق عليه الآن الغِلافَ الشمسي، أو مـدى تأثير الشمـس عبر المجموعـة الشمسية:

لم يَعُد نطاقُ بحثه مقتصراً علـى الكشـف عن خاصيةٍ فيزيائية مميزة داخلَ تكوينِ الشمس، وإنما يبشّرُ بحثُه بأن يكونَ وسيلةً للكشف عن مبدأ سائد عبر المجموعة الشمسية ومهيمن كالجاذبية، وأن يرسّخَ رابطاً آخَر في السلسلة التي تربط الأرضَ بالعوالم الأخرى.

الكشفُ الذي أشار إليه هو أنَّ بمقدورِ الشمس التأثيرَ على الأرض بطرائق أخرى غير التأثيرات المعروفة، مثل الضوء والجاذبية، وأثار ذلك الأمرُ جدلاً كبيراً آنذاك. ومضى أكثر من قرنٍ كامل قبل حسمِ هذا الجدلُ أخيراً وفهمِ العلاقة بين البُقَع الشمسية والاضطرابات الأرضية وقَبولِها.

ولكنْ تعيَّنَ علينا في البداية أن نُحسِّنَ من فَهْمنا للبُقَع الشمسية. كشف شواب عن وجودِ دورةٍ لظهورِ البُقَع الشمسية واختفائها، كما هو مبيَّنٌ حتى زمنٍ قريب في الشكل 20. وفجأةً أصبحتْ دراسةُ البُقَعِ الشمسية مجالاً من أكثر مَجالات البحوث الفلكية إثارةً، وشهِدَ القرنُ التاسعَ عشرَ شحْذَ العديد من أمهرِ وأبرعِ الراصدين مَواهبَهم لرصدِ الشمس بطرائق جديدة، وتحليلِ هذه الثروة من البيانات الرصدية التـي حصلـوا عليهـا. وعلـى مـدار الأعـوام المئـة التاليـة اكتُشِفَت ثروةٌ من الخواصِّ المميزة لدورة البُقَع الشمسية. ومن بين أبرز هذه الاكتشافات:

1- ارتفاعُ وانخفاضُ عددِ البُقَع الشمسية: يبلغ الزمنُ الفاصل بين الحدود الدُّنْيا المتتابِعة نحو أحدَ عشرَ عاماً، مع وجودِ انحرافاتٍ مِقدارُها عامان تقريباً في كلا الاتجاهَيْن (الشكل 20، الجزء السفلي). وتتَّسِم سعاتُ الدورات، أيْ عددُ البُقَع التي تظهر في ذُروةِ كلِّ دورة، بتنوُّعٍ كبير، مع حلولِ فتراتٍ موسمية يقلُّ فيها عددُ البُقَع الشمسية إلى أدنى حد.

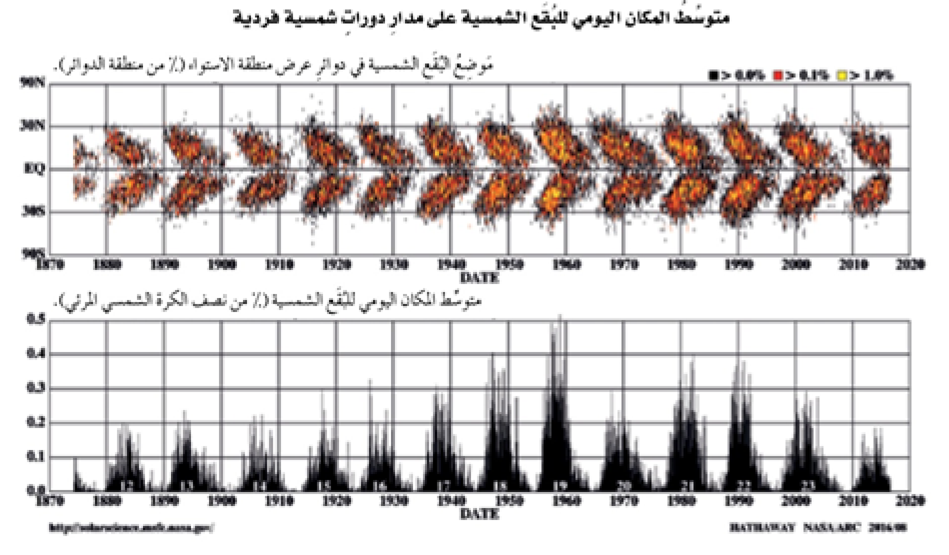
2- «مُخطَّط الفراشة» للبُقَع الشمسية: علـى مدارِ كلِّ دورة، تَظهر البُقَع الشمسية فـي البداية عند دوائر العرض العليا، بعيداً للغاية عن خط الاستواء الشمسي (الشكل 20، الجزء العلوي). ومع تقدُّم الدورة، تبدو البُقَعُ الشمسية البازغة أقربَ وأقربَ من خطِّ الاستواء، إلى أن تبدأ الدورةُ الجديدة وتبدأ البُقَع مرةً أخرى في الظهورِ عند دوائر العرض العليا.

3- الانعكاس المغناطيسي: عندما أُتيحَت قياساتُ المجال المغناطيسي، وُجِد أن البُقَع الشمسية تظهر في الأساسِ في اتجاهِ شرقي- غربي، وهو ما يَعْني أن المجالات المغناطيسية للبُقَع الشمسية لها فـي الأساس اتجاهٌ أفقي، موازٍ تقريباً لخط الاستواء.[11] وفي كل دورة من الـدورات، تتَّسِم غالبيةُ البُقَع فـي كل نصفِ كرةٍ شمسي بالنمط المغناطيسي نفسه، مع امتلاكِ البقعةِ المتقدمة (أي المتقدمة فـي اتجاهِ دوران الشمس) قطبيةً مغناطيسية خاصة، فـي حين تمتلكُ البُقَعُ في نصف الكرة الشمسي الآخَر قطبيةً مغناطيسية مُعاكِسة (الشكل 21). هـذه القاعدةُ التـي اكتشَفَها هيل تُعرَف باسم «قانون هيل». علاوةً على ذلك، سينطبقُ قانون هيل على دورةِ البقعة الشمسية التالية، ولكن مع انعكاسِ جميعِ الأقطاب المغناطيسية. وهذا يعني مرورَ دورتَيْن للبُقَع الشمسية قبل أن يتكرَّرَ النمطُ

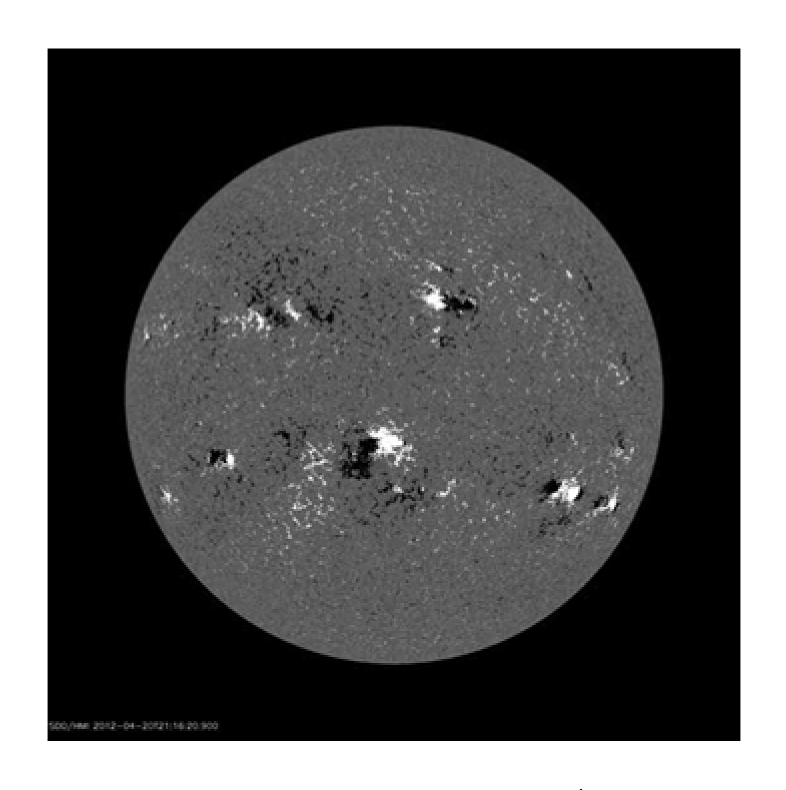
بالكامل، ومن ثَم تبلغ مدةُ الدورة المغناطيسية الكاملة 22 عاماً. يتبادل قُطْبا الشمس أيضاً قطبيتَهما، ويتزامن ذلك التبادُلُ تماماً مع ذُروةِ البقعة الشمسية.

نموذج دينامو إرشادي

حين يكون العلماءُ في المراحلِ الأولى من صياغة إحدى النظريات، ولا يَملِكون إلا فَهْماً جزئياً للظاهرة مَحل الدراسة، فمن المفيد عادةً اقتراحُ نموذجٍ تمهيدي يسترشد به العمل.



20- كشفتْ مُشاهَداتُ البُقَع الشمسية على مدار عقودٍ عديدة عن وجودِ نمطَيْن واضحَيْن ينبغي لأيِّ نظريةٍ تتناول أصلَ البُقَع الشمسية أن تكونَ قادرةً على تفسيرهما. يوضِّح الصفُّ السفلي مساحةَ البُقَع الشمسية على الشمس على مدار المئة والخمسين عاماً الماضية، ويَظهر السلوكُ الدوري بوضوحٍ هنا. ويوضِّح النصفُ العلوي من الشكل دوائرَ العرض التي تَظهر بها هذه البُقَع على الشمس، ويشير الشكلُ إلى أن ظهورَ البُقَع الشمسية يبدأ عند دوائر العرض العليا في وقتٍ مبكر من الدورة، ثم يهاجر ناحيةَ خطِّ الاستواء مع تقدُّم الدورة.



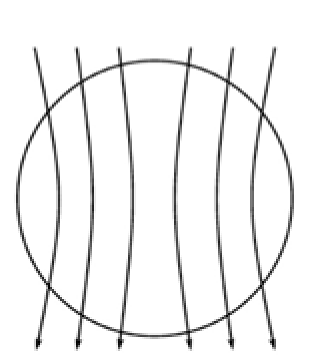
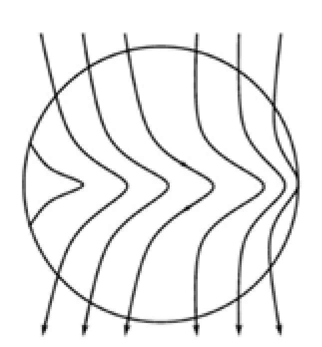
21 - خريطةٌ للمجالات المغناطيسية على السطح الشمسي توضِّح أن مناطقَ المجالات القوية التي تُنتِج البُقَعَ الشمسية تتَّخِذ اتجاهاً مماثلاً في كل نصفِ كرةٍ شمسي، مع تفضيلِ قطبيةٍ واحدة معيَّنة، تَظهر هنا باللون الأسود في الشمال، والأبيض في الجنوب. والقطبيتان متعاكستان في نصفَي الكرة المتعاكِسَيْن، كما هو موضَّحٌ في هذه الخريطة المغناطيسية التي تعود إلى آخِرِ ذُروةٍ للدورة الشمسية، في 20 أبريل من عام 2012. وفي دوراتِ البُقَع الشمسية المتتابعة التي تمتدُّ أحدَ عشرَ عاماً، تنعكسُ الاتجاهات؛ وبهذا فإن الدورةَ المغناطيسية الكاملة تساوي 22 عاماً.

قد تكون هذه النوعياتُ من النماذج غيرَ مكتمِلة، وهي بالتأكيد مؤقَّتة، لكن يَأمُلُ المرءُ أن تَضمَّ على الأقل جُلَّ الملامحِ الرئيسة للكشف، بحيث تتَّخِذ صورةً ما يُمكِننا أن نطلِقَ عليه تكهُّناً مدروساً. وقد اقتُرِح نموذجٌ كهذا للدورة الشمسية في ستينيات القرن العشرين، أولاً على يد هوراس دبليو بابكوك Horace W. Babcock في عام 1961، ثم روبرت لايتون في عام 1969، يُشار إليه عادةً باسم نموذج دينامو بابكوك- لايتون. وتَكمُن أهميةُ هذا النموذج الإرشادي في أنه يقدِّم طريقةً لتفسيرِ الدورة الشمسية باستخدامِ الخواصِّ المرصودة للشمس، لا سيما الدورانُ التفاضُلي وأنماطُ الحَمل الحراري للسطح.

ولوضْعِ أساسِ النموذج، نبدأ بالحالةِ المبدئية الأبسطِ للمجال المغناطيسي، ذي الاتجاه الرأسي والمتحرك من قُطْبٍ لآخَر، مثل مجال مغناطيس على هيئة قضيب، ويُعرف هذا باسم «المجال القطبي». في هذا النموذج، يخترقُ المجالُ النطاقَ الداخلي للشمس، الذي يدور على نحوٍ أسرعَ من السطح بسببِ الدوران التفاضُلي. وتنجرفُ أجزاءُ المجال الموجودة داخل الشمس بسرعةٍ أكبر من تلك التي تنجرف بها الأجزاءُ الخارجية الموجودة على مقربةٍ من السطح، وينتهي بها المطافُ باكتسابِ مُكوِّن أفقي، على النحوِ المبيَّن في الشكل 22. وهذا المجال، الذي يدور حول

الشمس، يُسمى «مجالاً حلقياً»، وهو مجالٌ يتحرَّك أفقياً، ويلتفُّ حول خط الاستواء مثل الطارة. وبعد إرساءِ هذه المعلومة الأساسية، يقترح النموذجُ سلسلةً من الخطوات لتفسيرِ الدورة الشمسية:

1- نبدأ بأبسطِ مجالٍ مغناطيسي؛ مجالٍ ثنائيِّ القُطْب شبيهٍ بمجالِ قضيبِ المغناطيس ذي التوجُّه الرأسـي. سيكون هذا المجالُ مجالاً قُطبياً، تخرج فيه خطوطُ المجال من القمة عند أحد القطبَيْن المغناطيسيَّيْن، وتمتدُّ حول الشمس وتُعاوِد الدخولَ قُربَ القاع عند القطب الآخَر. يخترق المجالُ الشمسَ ويتسبَّب الـدورانُ السريع لبِنية الشمس الداخلية قُربَ خط الاستواء في جذْبِ المجال معه، بحيث يتمدَّد ويلتفُّ حول الشمس (الشكل 22). [12]ومن المعتقَد أن طبقةَ القصِّ عند قاعدةِ منطقةِ الحَمل الحراري للشمس، التي سبَقَ أن ناقَشْناها في الفصل السابق، هي الموضعُ الذي يحدث فيه جُلُّ هذا التمدُّد والتضخُّم. وهذه الخطوة من العملية تحوِّل جزءاً من المجال المغناطيسي القطبي إلى مجالٍ حلقي.

22- يتسبَّب الدوران التفاضُلي للشمس (على اليسار)، بالترافُق مع دورانِ خط الاستواء بسرعةٍ أكبرَ من سرعة القُطبَيْن (على اليمين)، في تمدُّدِ مجالٍ مغناطيسي مبدئي ثنائيِّ القُطب (قطبي) إلى الخارج؛ ومن ثَم يكتسب المجالُ مكوِّناً حلَقياً يلتفُّ حول الشمس.

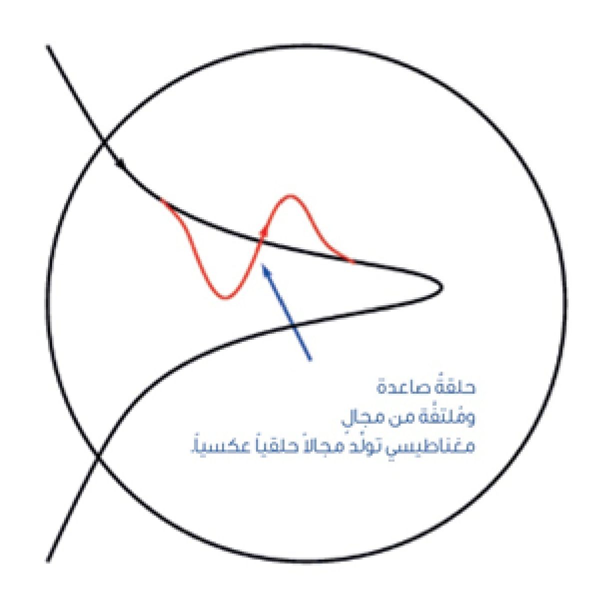
2- عندما يصير المجالُ المغناطيسي داخلَ الشمس قوياً بما يكفي، فإنه يتَّسِم بحالةٍ من عدم الاستقرار تتسبَّب في تدفُّقِ المجال إلى الأعلى، مثل الفتائلِ في شريطٍ مَطَّاطي مَبْروم.

3- تطفو الحلقاتُ الصاعدة من المجال المغناطيسي عبرَ طبقات الشمس، التي تصبح أقلَّ كثافةً قُربَ السطح، لتسمحَ للمجال بالتمدُّد مع انخفاضِ ضغطِ الغاز الشمسي المحلي المحيط. وبسبب الدوران الشمسي يتعرَّض المجالُ الصاعد والمتمدِّد لتأثيرِ كوريوليس Coriolis، بصورةٍ تشبهُ ما يحدثُ في الأعاصير الأرضية. في الحالة الأرضية، تتطوَّر الحركة الإعصارية لأنَّ الهواءَ الذي يتحرَّك داخلَ نظامٍ منخفضِ الضغط، ويتحرَّك إلى الأعلى من خط الاستواء، ينتقل بسرعةٍ أكبرَ من الهواء عند دوائرِ العرض العليا، في حين أن الهواءَ الذي يتحرَّك إلى الأسفل من

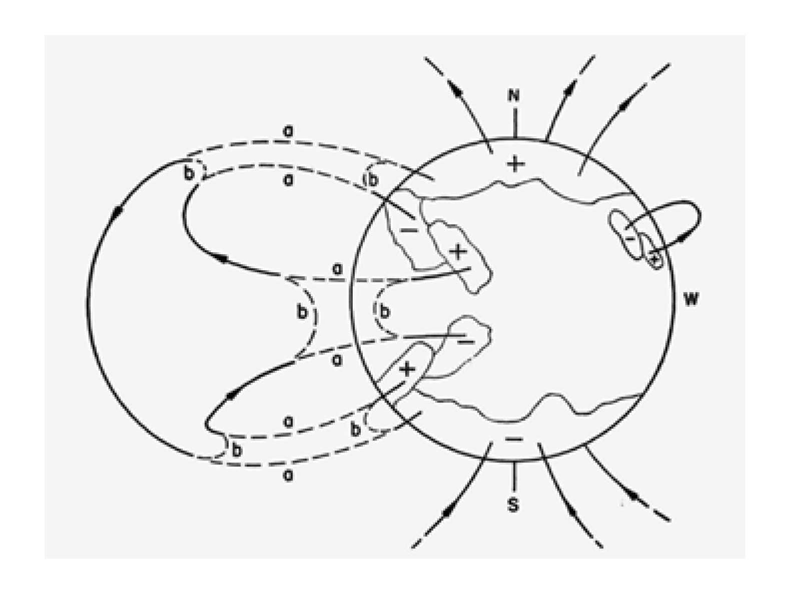
دوائر العرض العليا ينتقل بسرعةٍ أقلَّ من الهواء الذي يتحرَّك نحوه. وتكون النتيجةَ دوراناً للنظام يسبِّبه تدفُّقُ الهواء. في حالةِ النظام ذي الضغط المرتفع يتدفَّق الهواء في الاتجاه المعاكس، إلى الخارج، ويكون الدورانُ في الاتجاه العكسي. وهذا هو ما يحدث تماماً في الشمس، مع تمدُّدِ المجال المغناطيسي الصاعد أثناء تحرُّكه لأعلى. تدور حلقةُ المجال المغناطيسي ببطءٍ أثناءَ صعوده (الشكل 23)، بحيث تخرجُ من سطح الشمس ببعض المَيل. ويتسبَّب هذا الميلُ في تحويلِ بعضٍ من المجال الحلقي مجدداً إلى مجالٍ قُطبي، لكنه يكون ذا اتجاهٍ مُعاكِسٍ للمجال الحلقي الذي بدأ الدورةَ المغناطيسية في الأساس.

4- بعد الخروج من سطح الشمس، ينتشر المجالُ المغناطيسي عبر السطح. وبسببِ الميل الذي يَخرج به، تكوِّن القطبياتُ المغناطيسية المتقدِّمة لكل منطقةٍ بُقْعةً شمسية أقربَ إلى خط الاستواء من القطبيات التالية، ومن ثَم يُمكِنها التفاعُلُ مع القطبيات المتقدمة من مناطقِ نصفِ الكرة الشمسية الآخَر عبر خط الاستواء وإبطالُها (الشكل 24). عَدَّ بابكوك انتشارَ المجالاتِ المغناطيسية البازغة مُعْطًى رصدياً، وأمَّا لايتون فقد قدَّمَ آليةً خاصة به. ذكرنا في الفصل السابق أنه بالإضافة إلى الاهتزازاتِ العمودية الصغيرةِ النطاق، التي تستمر لخمسِ دقائق، وجَدَ لايتون أيضاً نمطاً أطولَ أمداً من حركاتٍ أفقيةٍ دائرية أكبرَ سمَّاها الحُبَيْبات الشمسية الفائقة (الشكل 25). ووَفْقَ حساباتِ لايتون، فإن هذه الحُبَيْبات الشمسية الفائقة تَجُوبُ المجالاتِ السطحيةَ في نمطِ سيرٍ عشوائي، يُسمَّى أحياناً «مِشية السِّكِّير»، بحيث تتقدَّم في اتجاهاتٍ عشوائية، تبتعد أكثرَ وأكثرَ عن نقطةِ البدء. ونتاجُ العملية، المعروفةِ باسم الانتشار الاضطرابي، هو أنَّ أيَّ منطقةٍ ذاتِ مجالٍ مركَّز، مثل تلك الموجودة حول إحدى البُقَع الشمسية، سوف تنتشر إلى الخارج بمعدلٍ يحدِّده حجمُ خطواتِ مِشية السِّكِّير وتكرارها، وتبيَّنَ أن هذا المعدلَ يتَّفِق مع ما هو مطلوبٌ لإبطالِ المجالات القُطبية المتعاكسة.

5- مرةً أخرى، بسببِ الميل، تبتعدُ القطبياتُ المتتالية أو المتعاقِبة لكلِّ منطقةِ بُقَعٍ شمسية عن خط الاستواء وتقترب من القطب الشمالي أو الجنوبي، وتنتشر إلى الخارج نحوَ هذَيْنِ القُطبَيْن. وبسببِ امتلاكِ قطبيةٍ مُعاكِسة للمجال المغناطيسي القطبي لنصف الكرة الشمسية هذا، فإنها تُبطِل المجالَ وفي النهاية تَعكسُه. وبالرغم من أن هذا قد يبدو غيرَ قابلٍ للتصديق بعضَ الشيء، فإنه رُصِد بالفعل. وتُظهِر خريطةٌ تُوضِّح تطوُّرَ المجال المغناطيسي على الشمس عبرَ عدةِ دوراتٍ شمسية هذه المجالاتِ القطبيةَ المعاكِسة وهي تنتقلُ نحوَ القطبَيْن من دوائر عرض المنطقة النَّشِطة، وتعكس القطبيات المغناطيسية هناك بحلولِ وقتِ بلوغ البُقَعِ الشمسية ذُروتَها في كل دورة (الشكل 26).



23- بعدَ أن يحوِّلَ الدورانُ التفاضُلي للشمس المجالَ المغناطيسي القطبي إلى مجالٍ حلقي يلتفُّ حول الشمس أفقياً، يصير المجالُ غيرَ مستقرٍّ ويخرجُ من باطن الشمس. ومع صعودِ المجال وتمدُّده، يُحوِّل تأثيرُ كوريوليس الناتجُ عن الدوران الشمسي المجالَ الحلقي مجدداً إلى مجالٍ قُطبي لكنه ذو اتجاهٍ معاكس للمجال الأصلي.



24- بُني نموذجُ بابكوك للدورة الشمسية على رصْدِ المجالات المغناطيسية على سطح الشمس، واستهدف تفسيرَ العديدِ من الظواهرِ ذاتِ الصلة بالدورة الشمسية، مثل: قانون القطبية لهيل، وقانون جوي Joy لميل البُقَع الشمسية، وعكسِ المجالات المغناطيسية في الدورات المتتابِعة. وهذا الشكلُ المأخوذ من البحث الذي نشره عام 1961، يُظهِر كيف أن المجالات المغناطيسية المنتشرة إلى الخارج من مناطق البُقَع الشمسية عبرَ خطِّ الاستواء تُبطِل أيضاً المجالاتِ القطبيةَ؛ وبذلك تسبِّب عكسَ القطبية الثنائية وبدْءَ دورةٍ جديدة.

6- حينئذٍ تبدأ دورةُ البُقَع الشمسية من جديد، مع عكسِ جميع القطبيات المغناطيسية. ويوضِّح الشكلُ 27 ارتفاعَ النشاطِ الشمسي وانخفاضَه على مدارِ دورتَيْن للبُقَع الشمسية تقريباً؛ ممَّا يشكِّل دورةً مغناطيسية كاملة.

وضع معادلات رياضية للدينامو

كان الباعثُ الأساسي وراءَ التفسير الحديث لمغناطيسية الشمس هو مُحاوَلة فَهْم المجال المغناطيسي للأرض، واضطلع بتلك المحاوَلة عالِمٌ خجولٌ وانطوائي وصَفَه عالِمُ الفيزياء الشمسية يوجين باركر Eugene Parker (الذي واصَلَ عملَه وتوسَّعَ فيه) بأنه رجل «يكره بشدةٍ أن يُثبت جدارته على الصعيد العِلمي المُولَع بالانتقاد».



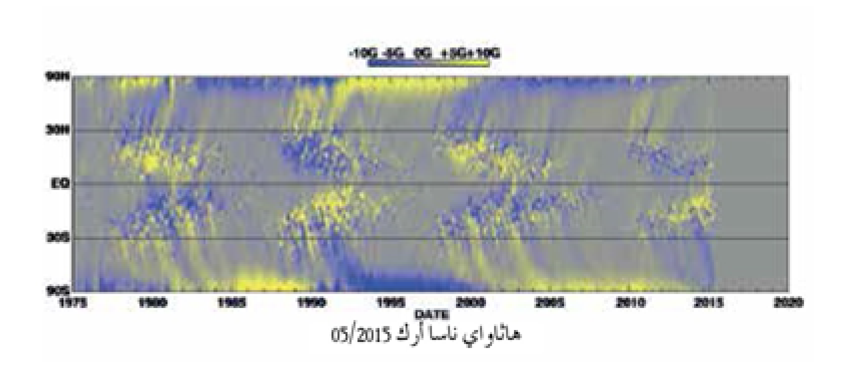
25- تَعرضُ هذه الصورةُ نسخةً حديثة من شكلِ الحُبَيْبات الشمسية الفائقة للايتون، وهي خريطةٌ للسرعات المتجهة نحوَ الراصد أو بعيداً عنه، مأخوذةٌ من جهازِ تصوير ميكلسون- دوبلر Michelson Doppler Imager الموجود في مرصد الشمس وغِلافها (الذي يُشار إليه بالاختصار سوهو، SOHO)، وتوضِّح الحُبَيْباتِ الفائقةَ التي تغطي سطحَ الشمس. إن حركاتِ الحُبَيْبات الفائقة موازيةٌ للسطح، ومن ثَم لا يوجد تقريباً أيُّ مكوِّن متجهٍ ناحيتَنا في منتصف القُرص. تتحرَّك الحُبَيْبات الشمسية الفائقة عبر سطح الشمس، بصورةٍ موازية له؛ وعليه، ففي مركزِ قُرْص الشمس تكون حركتُها من جانب إلى جانب كما نراها، دونَ وجودِ أيِّ مكوِّنٍ للحركة متجهٍ ناحيتَنا. هذا التدفُّقُ أفقيٌّ، ويتجه إلى الخارج انطلاقاً من مراكز الحبيبات، وسرعتُه في المعتاد 400 ميل في الثانية، وتُرى هذه الحركاتُ في صورةِ مَلامحَ دائريةٍ ساطعة وداكنة شبيهة بفُوَّهات البراكين في كل أرجاء الشمس.

وُلِد والتـر إم إلساسر Walter M. Elsasser فـي مانهايم بألمانيـا لعائلةٍ بروتستانتية مرموقة كانت تَعتنقُ اليهودية فيما سبق. لم يَعلَم إلساسر شيئاً عن تاريخِ أسرته هذا حتى بلوغِه سنَّ المراهَقة، لكن ذلك ترَكَ آثاراً جسيمة على حياته وعمله مع مرورِ ألمانيا بتغييراتٍ جذرية فـي عشرينيات القرن العشرين وثلاثينياته. وربما تمثَّلت أولى صعوباتِ حياته فـي حثِّ والِدِه له على التقدُّم لنيْلِ عضويةِ أخويةِ المدرسة الثانوية، أملاً في أن يساعِدَه هذا على ألَّا يبدو شخصاً انطوائياً مهووساً بالعِلم. وفُوجِئ عندما قُوبِلَ طلبُ الالتحاق بالرفض؛ لأنَّ ذَوي الأصل اليهودي غيرُ مسموحٍ لهم بالانضمام إلى الأخويات.

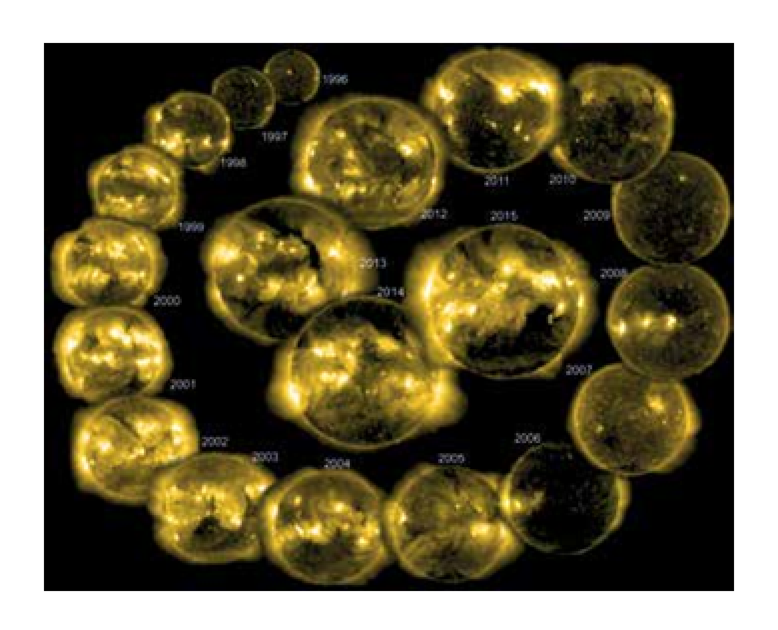
لكنه لم يواجه الصعوباتِ الأشدَّ جسامةً إلا بعدَ سنوات، ونجَحَ إلساسر في دراسةِ مجموعةٍ كبيرة من الموضوعات التي تثير اهتمامه، من بينها نَهْجُه الفلسفي القوي نحوَ دراسةِ العلوم الطبيعية. وقد خلص إلى أنَّ قبولَ الأفكار العلمية يعتمد اعتماداً كلياً على مدى توافُقِها مع المفاهيم السائدة؛ تلك المفاهيم التي لم تزل تَخضعُ بدرجةٍ كبيرة لِلَّاوعي. ووصَفَه طبيبُ العائلة حينذاك بأنه «شديد التوتر»، وهي نقطةُ ضَعفٍ قرَّرَ إلساسر أن يحوِّلَها إلى نقطةِ قوةٍ بعد قراءته رواية «البحـث عـن الزمـن المفقـود» (Remembrance of Things Past) لمارسيل بروست Marcel Proust؛ ومن ثَمَّ شرعَ في مُحاوَلة فَهْم كيفية السموِّ بالاضطـراب العصبي وتحويله إلـى اتجاهاتٍ بنَّاءة. وبعد تخرُّجِه فـي المدرسة الثانوية في عام 1922، سافَرَ إلى هايدلبرغ، إذ انتابه الفزعُ عندما رأى أن المُحاضِرَ الرئيس الحائز جائزة نوبل يرتدي صليباً معقوفاً فضياً ضخماً. نصَحَ العديدُ من الأشخاص إلساسر بالمغادَرة، وفي عام 1923 انتقل إلى ميونخ، ليتتلمَذَ على يدِ فلهلم فين Wilhelm Wien في مجال الفيزياء التجريبية، وأرنولد سومرفيلد Arnold Sommerfeld في مجال الفيزيـاء النظريـة. وبالرغـم من سعادتِه بالدراسة هناك، أخبره أحدُ أعضاءِ هيئة التدريس في النهاية أن جميعَ أعضاءِ هيئة التدريس بالكلية ينتمون إلى الحزبِ النازي، ونصَحَه بالانتقال إلى جامعة غوتينغن. وانتقل إليها بالفعل في عام 1925، وفي حوزتِه خطابُ تعريفٍ لجيمس فرانك James Franck، الذي قبِله، وفي غضونِ عامٍ واحد شجَّعَه على نشْرِ بحثٍ قصير أنيق يفسِّر بعضَ النتائـج التجريبية المحيِّرة حـول تشتُّت الإلكترونـات من

البلاتنيوم نتيجةَ السلوكِ الموجي للمادة الذي اقترحه أينشتاين Einstein ولويس دي بروي Louis de Broglie.

نال إلساسر درجةَ الدكتوراه في عام 1927، وتلقَّى عَرضاً غيرَ متوقَّع من الفيزيائي النظري المعروف بول إهرنفست Paul Ehrenfest للعمل مُساعِداً له في هولندا، بالرغم من أن هذا العرْضَ جاء في خطابٍ طويل من إهرنفست يتحدَّث فيه عن المشكلات النفسية التي يعانيها. كان ينبغي لهذا أن يكونَ بمنزلةِ تحذير؛ لأنه بالرغم من إعجابِ إلساسر بهولندا، فإن إهرنفست عامَلَه في بدايةِ الأمر بحِدةٍ تحوَّلتْ بعد ذلك إلى عداءٍ سافِر، دونَ أي مبرِّرٍ واضح. وفي نهاية المطاف، طلب إهرنفست من إلساسر أن يُغادِرَ ويعود إلى برلين، وهناك اضطرَّ إلى أن يَقطنَ مع والِدَيْه. (انتحر إهرنفست بعد ذلك ببضع سنوات). لم يستطِعْ إلساسر الحصولَ على وظيفةٍ جامعية في تلك السنوات، وفي عام 1929 قَبِلَ عرضاً بالعمل في جامعة خاركوف في الاتحاد السوفييتي. لكن المرضَ أرغَمَه على العودة إلى ألمانيا، وانتهى به المطاف إلى الاستقرار في فرانكفورت في عام 1931. وفي شهر أبريل عام 1933، اعتلى النازيُّون سُدَّةَ الحُكم ونصَحَه طبيبُه النفسي بالهروب إلى سويسرا قبل إغلاقِ الحدود، وهو ما فعَلَه بعد مُواجَهةٍ مع بعضِ أفرادِ كتيبةِ العاصفة لهتلر، الذين احتلوا الجامعة.



26- توضِّح هذه الخريطةُ تطوُّرَ المجال المغناطيسي لسطح الشمس على مدارِ أربعِ دوراتٍ للبُقَع الشمسية، وتُظهِر تقدُّمَ المجالات البازغة خلالَ كل دورة نحوَ خط الاستواء، وانحرافَ ما تبقَّى من المجال المغناطيسي ناحيةَ القطبَيْن، وعكس قطبيات المجالات القطبية، والعكس الكلي لقطبيات النصفين الشمالي والجنوبي المغناطيسية من كلِّ دورةٍ إلى التي تليها.



27- يوضِّح هذا الشكلُ النشاطَ الشمسي على مدار عشرين عاماً؛ أيْ ما يَقربُ من دورتَيْن من دوراتِ البُقَع الشمسية، كما رصده تلسكوبُ تصويرِ الأشعة فوق البنفسجية القصوى الموجودُ على مرصد سوهو، من دورة الشمس الدنيا عام 1996، إلى الذُّروة الشمسية في عام 2001، التي تلتها دورةٌ شمسية دُنيا أخرى عام 2009، ثم الذُّروة الشمسية الأحدث في عامَيْ 2014 و2015.

بعد وصول إلساسر إلى زيورخ، استُقبِل بحفاوةٍ بالغة من جانبِ الفيزيائي النظري البارز فولفغانغ باولـي Wolfgang Pauli، الذي علم بوجودِ وظيفةٍ شاغرة فـي باريس، وهناك، حصل له فردريك جوليو Frédéric Joliot (زوج ابنة مدام كوري Madame Curie) على زَمالةٍ من الاتحاد الإسرائيلي العالَمي. نظر إلساسر إلى هذا العرض بوصفه بادرةَ عطفٍ، وكان أسعدَ في العام التالي حينما نال منصباً في المركز الوطني الفرنسي للبحث العلمي، وتمكَّنَ حينذاك أيضاً من إيجادِ وظائفَ لعددٍ كبيرٍ من العلماء اللاجئين الآخَرين الهاربين من ألمانيا. وتضمَّنَ عملُه في تلك السنوات إسهاماتٍ بارزةً في فَهْمِ نواةِ الذرة، وهو الفَهْمُ الذي أكمَلَه بعد ذلك بسنواتٍ جيه هانز دي ينسن J. Hans D. Jensen وماريا غوبرت ماير Maria Goeppert Mayer، اللذان فازا بجائزة نوبل بسببه.

ولكَيْ يظلَّ إلساسر فـي فرنسا كان عليه أن يَطلبَ المُواطَنة، لكنه اختارَ أن يتقدَّمَ عوضاً عن ذلك بطلبٍ لدخول الولايات المتحدة، وحصل عليه فـي عام 1935. وبالرغم من أنـه قابَلَ زوجتَه المستقبلية، على السفينة المتجهة إلى الولايات المتحدة، فإن هذا كان المردودَ الجيد الوحيد الذي ناله من هذه الرحلة؛ لأنه عجَزَ عن العثورِ على أيِّ وظيفةٍ هناك وعاد إلى باريس. وبعد مُضِي عام، كرَّرَ المحاوَلةَ لينتهي به الحال في معهد كاليفورنيا للتقنية؛ حيث كانت الوظيفة الوحيدة الشاغرة في مجال فيزياء الأرض، في قسم الأرصاد الجوية الجديد، المُختَص بدراسة خاصتي التبريد والتدفئة بالإشعاعِ للغِلاف الجوي. لكنه أُقِيلَ من هذه الوظيفة بصورةٍ مفاجئة في عام 1941 حين اتُّهِم ظُلماً بأنه حثَّ أحدَ «بيروقراطيي واشنطن» (عالِم شهير يُدعى كـارل غوستاف روسـبي Carl-Gustav Rossby) على استغلالِ نفوذه بشكلٍ غيرِ مشروعٍ كي يحصلَ له على وظيفةٍ أعلى.

كان الاتهامُ زائفاً، ولكنْ بدلاً من أن يُدافِعَ إلساسر عن نفسه، اكتفى بحَزْمِ حقائبه والرحيل، لينتهيَ به الحال في مرصد بلو هيل Blue Hill Observatory في جنوب بوسطن، إلى أن أدَّى عدوانُ بيرل هاربر في عام 1941 إلى استدعائِه للخدمة العسكرية في فيلقِ سلاحِ الإشارة الأمريكي. وفـي نهاية الحرب، كان يعمل لصالح «لجنة الانتشار الراديوي» Radio Propagation Committee في مبنى الإمباير ستيت، واستغلَّ عطلاتِ نهايةِ الأسبوع للعمل على نظريتِه الخاصة بمغناطيسية الأرض.

طوَّرَ إلساسر النظريةَ ونشَرَها فـي سلسلةٍ من ثـلاثةِ منشورات فـي دوريـة «المراجعة الفيزيائية» Physical Review خـلالَ عامَيْ 1946 و1947، ونشَرَ مُلخَّصاً منهجياً لفيزياء باطن الأرض فـي دورية «مراجعات الفيزياء الحديثة» Reviews of Modern Physics في عام 1950. كان عمَلُه هذا رائداً حقاً؛ إذ لم يكُن هناك شيءٌ مثله في ذلك الوقت.[13] وبعد أن فحَصَ الأدلةَ علـى وجودِ لُب خارجيّ يتكوَّن من الحديد السائل داخلَ الأرض، وهو ما يتماشى مع الدراسات التي بدَأَها ريتشارد ديكسون أولدهام، لاحَظَ كذلك أن الأدلةَ الجيولوجية تشير إلى أن اتجاهَ المجالِ المغناطيسي للأرض قد انقلب، بحيث تبادَلَ القطبان الشمالي والجنوبي مكانَيْهما، على فتراتٍ مِقدارُها عدةُ مئاتِ الآلاف من السنين تقريباً. وعليه فإن هذا لا يعني أنَّ ثَمة آليةً تقوم بتوليدِ مجال الأرض فقط، وإنما يعنـي أنهـا لا بدَّ أن تسمحَ أيضاً بانعكاسِ اتجاه المجال على فترات.

أجرى إلساسر عملياتٍ حسابيةً مُطولة تثبت أن نظريةً رياضيةً قائمة علـى الجريان المضطرب لِلُبِّ الأرض الحديـدي السائلِ (وإن كانت سرعتُه لا تتعدَّى 0.03 سم/سنة فقط) بالتزامن مع دوران الأرض، هي التفسيرُ الأمثل للخواصِّ المرصودة لمجال الأرض. واقترح أن السلوكَ الدوري للمجالات نشأ عن تغذيةٍ مُرتدَّةٍ بين ما سمَّاه مجالاً مغناطيسياً قُطبياً (يتجه من أحدِ القطبَيْن إلى الآخَر داخل الأرض) ومجالاً حلقياً (يدور حول الأرض، مثل خط الاستواء). وكما رأينا في نموذج بابكوك- لايتـون، فقد استُخدِمت النظريــة نفسها لاحقاً لتفسيرِ كيف يتولَّد المجال المغناطيسي للشمس.

قُوبِلتْ نظريةُ إلساسر بالتجاهُل بشكلٍ كبير، أو قُوبِلتْ بمُعارَضةٍ من جانبِ القليلين الذين ناقَشوها، وذلك حتى عام 1950 عندما أثبَتَ عالِمُ الرياضيات البريطاني جورج كيه باتشيلور G. K. Batchelor أن الجريانَ المضطرب العشوائي لسائلٍ موصلٍ يُمكِنه في الواقع تضخيمُ أيِّ كميةٍ شاردة محـدودة مـن المجال المغناطيسي. وحينذاك، قُبِلَت نظريةُ الدينامو لإلساسر وطُوِّرَت، لكنه في ذلك الحين كان قد انتقل إلى العمـل الذي أفنـى فيـه عقـودَ حياتِه الأخـيرة؛ ألا وهـو دراساتُه البيولوجية المتمركزة حولَ نظريةٍ عامة للكائنات الحية.



28- نافذةٌ من الزجاج الملوَّن في القرن التاسع عشر بمرصدِ رائِدَي الفلك الإنجليزيَّيْن وليام ومارغريت هاغينز

William and Margaret Huggins، معروضة الآن في كلية ويلسلي في ماساتشوستس. يحتوي الزجاج الملوَّن على طيف فراونهوفر Fraunhofer وتظهر فيه خطوطِ الامتصاص واضحة، وثلاثةُ خطوطِ انبعاثٍ من سديمٍ كوكبي، وسديم حلزوني (اكتُشِف بعد ذلك أنه مَجَرَّة حلزونية)، ومُذنَّب، والشمس (يحيط بها وهَجُها الأحمر وإكليلٌ أبيض)، وبعض النجوم.

الفصل الرابع
الطيف وأسراره

هناك معجزاتٌ عديدة نُعامِلها معاملةَ الأشياء المسلَّم بها، منها معجزةُ الرؤية. فثَمة شيءٌ ما اسمه «الضوء» أو «النور» ينتج بطريقةٍ ما ويسمحُ لنا برؤيةِ الأجسام الماديـة الموجودة فـي العالَم من حولنا، ومعظمُها له لونٌ ما.

كان مـن الشائع فيما مضــى أن تُستخدَم كلمة «نور» استخداماً مجازياً في سياقات الفِكر الديني (كما في عبارة «وقال الربُّ ليكُنْ نورٌ فكانَ نور» فـي الكتاب المقدس)، وفي وصْفِ الثقافة (كأنْ نتحدَّث عن عصور الظلام وعصر التنوير)، وفـي علم النفس (عندما يكون الشخص في مزاجٍ سيئ يبدو العالَم له مُظلِماً، والعكس صحيح)، وفي استخدامها مرادفاً للحقيقة (كأنْ يرى شخصٌ ما الظلماتِ من النور). ولكنْ، خلفَ هذه المعاني الرمزية يوجد كيانٌ مادي حقيقي يُسمَّى الضوء، وهذا الكيانُ يتحوَّل إلى لغزٍ بمجردِ أن نحاولَ استقصاءَ ماهيَّتِه. أهو شيءٌ مادي؟ وإذا كان كذلك، فلماذا إذن لا يُمكِنُنا الإمساكُ به ووضْعُه في جرَّةٍ وحملها معنا أينما ذهبنا؟ لماذا لا نشعر بتأثير الضوء عندما يسقط علينا؟ لماذا يبدو الضوء وكأنه لا ثِقَلَ له ما دام شيئاً مادياً؟

وماذا عن اللون؟ يبدو اللونُ من خواصِّ الأجسام، والضوء هو ما يسمح لنا برؤيةِ الألوان. هل ستظل هذه الألوانُ موجودةً حتى إذا لم يكن هناك ضوءٌ مُسلَّطٌ عليها؟ ولكن عند تمريرِ الضوء عبر قطعةٍ من الزجاج الملوَّن وتسليطه على سطح أبيض، فإن السطحَ الذي يسقط عليه الضوءُ يتَّخِذُ لونَ الزجاج، فهل يعني ذلك إذَن أن اللونَ كيانٌ منفصِل عن الضوء، أم أن اللونَ كامنٌ في الضوء؟ إذا كان الخيارُ الأخير هو الصحيح، فلماذا لا نرى شعاعاً ملوَّناً عندما يمر الضوءُ عبر الهواء؟ كيف يُمكِن أن يكونَ للضوء لونٌ؟ وما الذي يُمكِن أن يَعْنيه ذلك؟ وكيف لنا أن نعرفَ ما إذا كان الضوء ينتقل من مكانٍ إلى آخَر، أم أنه - على سبيل المثال - ناتج عن إثارةِ شيءٍ موجود بالفعل؟

شكلتْ هذه الأسئلةُ المثارة حـول طبيعةِ الضوء جزءاً من تراثنا الفكري لآلاف السنين، وبالمثل، فإن القصةَ التي انتهتْ بتوصُّلِنا إلى فَهْمِ ماهية الضوء وكيفيةِ تفاعُله مع المادة، تمتدُّ عبر تاريخ الفِكر العِلمي بأكمله تقريباً. وقد كان للعملية التي تمخَّضتْ عن هذا التطوُّر الفكري الفضْلُ فـي تعليمنا كيفيةَ التمييزِ بين المظاهر - أيْ شكل الأشياء كما تبدو لنا بعد تصفيتِها ومُعالَجتها من خلال

أجهزتِنا الحسّية - وما يُمكِن أن نُطلِقَ عليه اسمَ الواقع الموضوعي، وهو شكلُ الأشياء كما هي بغضِّ النظر عن إدراكنا لها أو حتى وجودنا.[14]

إذا أردنا أن نَفهمَ ماهيةَ الضوء، فنحن بحاجةٍ إلى إيجادِ طريقةٍ للتمييز بين إدراكِنا للضوء وخصائصِ الضوء التي تتخطَّى إدراكَنا: هل الألوانُ في حد ذاتها موجودةٌ في العالَم من حولنا؟ أم أنها مَحْضُ إدراكٍ يتكوَّن في أذهاننا عبر أجهزتنا الحسيَّة؟ بالنسبة للعلماء، بدأتْ عمليةُ فَهْم الضوء وخصائصِه في القرن السابع عشر على يدِ اثنين من عَمالقةِ العلوم؛ ألا وهما إسحاق نيوتن Isaac Newton وكريستيان هوغنس Christiaan Huygens. [15]ومن الممكن تتبُّعُ بدايات النظريةِ النفسية، الراسخةِ في الإدراك البشري، إلى يوهان فولفغانغ فون غوته Johann Wolfgang von Goethe (مؤلِّف مسرحية «فاوست» (Faust)) وكتابِه «نظرية الألوان» (*Zur Farbenlehre*) المنشور في عام 1810.

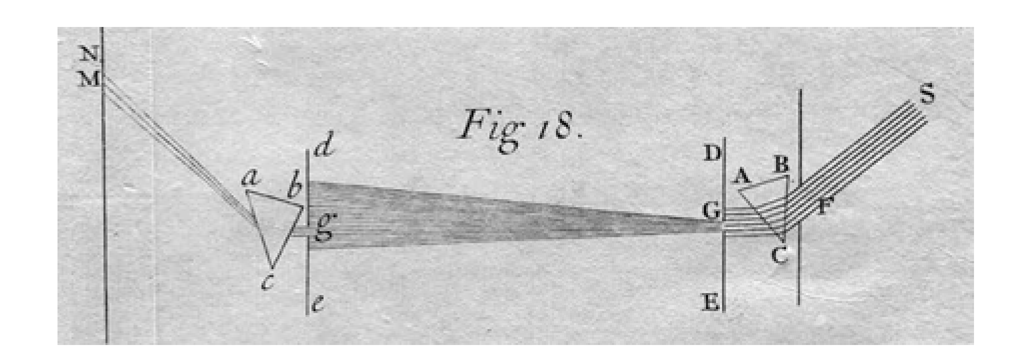
الضوء والألوان

كانت الطبيعةُ وقوانين الطبيعة متخفِّيةً في الظلام،

حتى قال الربُّ لنيوتن: «كُنْ!» فكان وعَمَّ النورُ الدنيا.

- ألكسندر بوب

المقطعُ المقتبَسُ أعلاه تَشُوبه المبالَغةُ بالطبع، لكنه يُعطِينا انطباعاً عن نظرةِ المجتمع البريطاني إلى إنجازاتِ نيوتن بعد وفاته. (وفي نهاية المطاف، في عام 1930، كتب السير جون كولينغز سكواير John Collings Squire تعليقاً لاذعاً قال فيه: «لم يَدُمِ الأمرُ طويلاً؛ إذ قال الشيطان صارخاً:



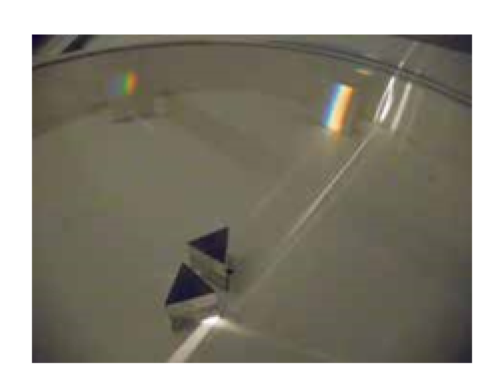
٢٩- «التجرِبةَ الحاسِمة» لنيوتن، التي رسَمَها لاحقاً كي تَظهرَ في كتابه الصادر عام 1704 بعنوان «البصريات» (Optics)، وفيها يدخلُ ضوءُ الشمس من اليمين.

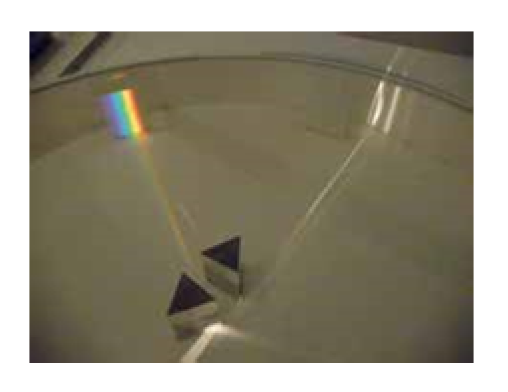
«فَلْيكُنْ أينشتاين»، وأعاد الوضْعَ إلى ما كان عليه»).

إننا نتذكَّر نيوتن بالأساس لكونه عالِمَ رياضيات، وأحدَ مَن شغلوا كرسيَّ أستاذية لوكاسي في الرياضيات بجامعة كامبردج، ولعمله في تطويرِ حسابِ التفاضل والتكامل، وقوانينِ الحركة في الفيزياء، وقانونِ الجَذْب العام الذي ساعَدَ في تفسير حركات الكواكب. لكن نيوتن كان أيضاً مُجرِّباً بارزاً، وبنى أولَ تلسكوب عاكس معروف (وذلك باستخدام المرايا بدلاً من العدسات لتركيز الضوء الوارد)، وأجرى أيضاً سلسلةً طويلة من التجارِب الدقيقة حلَّلَ فيها طبيعةَ الضوء واللون. وأمضى نيوتن سنواتِه الأخيرةَ رئيساً لدارِ سكِّ العملةِ الملكية، إذ ساعَدَ في إدانةِ عشراتِ المزوِّرين والحكمِ عليهم بالإعدام شنقاً.

نيوتن واللون

وُلِد نيوتن فـي يوم عيد الميلاد عام 1642 وَفْقاً للتقويم اليولياني المُستخدَم حينذاك (وبتحويل هذا التاريخ إلى التقويم الغريغوري القائم حالياً، يتَّضِح أن نيوتـن وُلِـد فـي 4 يناير 1643).





30- تمثيلٌ لاكتشاف نيوتن أن ضوءَ الشمس (الضوء الأبيض في الصورة اليسرى) المارَّ عبرَ موشور يُمكِن تشتيتُه باستخدام الموشور إلى ألوانِ قوس قُزَح، ويُمكِن أيضاً تجميعُه بعدها ليشكِّلَ ضوءاً أبيضَ باستخدامِ موشور مقلوبٍ آخَر (الصورة اليمنى). في هذا التمثيلِ الذي جرى بمكتبةِ هنتنغتون بمدينة سان مارينو في ولاية كاليفورنيا الأمريكية، استُخدِمت رافعةٌ لتحريكِ الموشور الثاني الظاهر في الصورة السفلية بحيث اعترض الموشور مسارَ الألوان القُزَحية، وكسر الضوء مرةً أخرى إلى اليمين، ثم أعاد تجميعَ الألوانِ في ضوءٍ أبيضَ.

وبعد فترةٍ وجيزة من حصوله على درجة البكالوريوس من كلية ترينيتي بجامعة كامبردج، كان نيوتن الشابُّ من بين أولئك الذين أعادتهم الجامعةُ إلى بيوتهم بسببِ انتشارِ الطاعون بين عامَيْ 1665 و1667. وخلال إقامتِه في بيته في وولسثورب، أجرى نيوتن سلسلةً من التجارِب حول طبيعة الضوء.

في تجربة نيوتن (التي لم تزل تُعرَف باسم «التجربة الحاسِمة»)، اختبر نيوتن إحدى الفَرْضيات السائدة آنذاك، والتي تذهب إلى أنه خلالَ انكسارِ (انحناء) الضوء، يُنتِج الموشور الألوانَ التي يُمكِن ملاحظتُها في شعاع الضوء الذي يخرج من الموشور. ولكي يختبرَ نيوتن تلك الفَرْضية، مرَّرَ شعاعاً من ضوء الشمس عبر ثُقْبٍ في ستارِ نافذته ليصطدمَ الشعاعُ بموشور. أدَّى ذلك إلى انقسامِ ضوءِ الشمس إلى قوسِ قُزَحٍ من الألوان. بعد ذلك، عزَلَ نيوتن أحدَ الألوان باستخدامِ ثُقبٍ صغير في حاجِزٍ ثانٍ، ثم مرَّرَ اللونُ عبر موشور آخَر ليكتشفَ أن اللونَ لم ينقسم إلى ألوانٍ أخرى وإنما انكسر (أيِ انحنى) هذه المرةَ بمِقدارِ الانكسار نفسه في المرة الأولى. ومن هنا، خَلُصَ نيوتن إلى أن انكسارَ الضوءِ لا يَخلقُ الألوان، وإنما يتكون الضوء من «أشعةٍ مُتبايِنة» تختلف في «درجة انكسارها»، والانكسارُ يجعلها مرئيةً لكنه لا يسبِّبها.

وفي تجربةٍ أخرى، استخدَمَ نيوتن عدسةً عَكَسَ بها ألوانَ قوسِ قُزَحٍ من الموشور الأول على موشور ثانٍ مقلوب. جمَعَ هذا الموشور الثاني الألوانَ في ضوءٍ أبيضَ مرةً أخرى (الشكل 30). لكن نيوتن مرَّرَ هذا الشعاعَ الجديد من الضوء الأبيض عبرَ موشورٍ ثالث غيرِ مقلوب، ممَّا أدى إلى ظهورِ قوسِ قُزَحٍ مرةً أخرى، وسقط هذه المرة على حاجز.

أضاف نيوتن إلى الألوان الخمسة التي حصَرَها في البداية لونَيْن، هما النيلي والبرتقالي، بحيث صار لديه سبعةُ ألوانٍ تتطابق مع سبْعِ نغماتٍ على السُّلَّم الموسيقي. وما زلنا إلى الآن كثيراً ما نُذكِّر أنفُسَنا بترتيبِ هذه الألوانِ عن طريقِ استدعاءِ اسمِ روي جي بيف ROY G BIV؛ الشخص الخيالي الذي يمثِّل كلُّ حرفٍ من حروفِ اسمه الحرفَ الأول من أسماءِ الألوان بترتيبها الصحيح باللغة الإنجليزية: الأحمر، والبرتقالي، والأصفر، والأخضر، والأزرق، والنيلي، والبنفسجي. وعلى الأرجح، كان نيوتن أحدَ الأشخاص القليلين الذين رأوا اللونَ النيليَّ بوصفه لوناً منفصلاً، في حين يرى معظمُنا أنه درجةٌ من درجاتِ اللون الأزرق.

علِمَ نيوتن بنظريةِ كريستيان هوغنس (1629 - 1695) التي وضَعَها عام 1678، وتقضي بأن الضوءَ يتكوَّن من موجاتٍ وليس جُسَيمات. وعلى أي حال، يُمكِن لشعاعَيْن من الضوء أن يمرَّ أحدُهما عبرَ الآخَر دونَ حدوث أيِّ تفاعُلٍ يُذكَر بينهما. لكن نيوتن أشار إلى وجودِ مشكلاتٍ تَشُوب النظريةَ الموجية لهوغنس، وقال: «إذا كان الضوء يتكوَّن من تموُّجاتٍ تتحرَّك في وسطٍ مَرِن، فلا بدَّ أن ينتشرَ الضوءُ في كل اتجاهٍ مُبتعِداً عن كلِّ مركزِ اضطرابٍ جديد». التقى نيوتن وهوغنس في عام 1689 عندما جاء هوغنس إلى لندن بالتزامُن مع اعتلاءِ ملكٍ هولندي العرشَ البريطاني. وتبادَلَ العالمان الرسائلَ بعدَها حول مسائلِ البصريات وقضايا أخرى، لكنهما لم يصِلا إلى اتفاقٍ حول مسألةِ الطبيعة الموجية في مقابلِ الطبيعة الجُسَيمية للضوء. وفي كتاب

«البصريات» المنشور في عام 1704، طرح نيوتن نظريةً جُسَيمية للضوء، وهي نظريةً تقضي بأن الضوءَ يتكوَّن من جُسَيماتٍ دقيقة.

استمرَّ الصراعِ بين النظريةِ الموجية والنظريةِ الجُسيمية لعدةِ قرون؛ إذ كان بمقدورِ كلِّ نظريةٍ منهما - موجيةً كانت أم جُسيمية - تفسيرُ بعضِ خواصِّ الضوء وليس كلها. ولم يَحسِمِ القضيةَ في النهاية إلا التفسيرُ المستمَدُّ من ميكانيكا الكَمِّ، والقائل بأن الضوءَ يَسلُكُ سلوكَ الموجة تارةً، وسلوكَ مجموعةٍ من الجُسيمات (نسمِّيها الفوتونات) تارةً أخرى، وذلك اعتماداً على طريقةِ دراسته. وبهذا فإننا نتحدَّث الآن عن «ازدواجية الموجة- الجُسَيم».

نظريات الرؤية

نعلمُ أن أفلاطون وأرسطو كانَ لهما رأيٌ مختلِفٌ منذ نحو 2400 عامٍ حولَ مسألةِ ما إذا كانت العينُ تُرسِل أشعةً تستشعِرُ بها الأشياءَ التي ننظر إليها أم تحسُّ بها بطريقةٍ ما، أو ما إذا كانت العين تستقبلُ أشعةً منبعثة من تلك الأشياء. وصاغ هيرو السكندري Hero of Alexandria في عام 100م تقريباً مبدأ «المسار الأَقْصر»، الذي يَقْضي بأن الضوءَ يَسلُك الطريقَ الأَقْصر عند الانتقال بين نقطتَيْن. وأضاف هيرو لاحقاً أن هذا يُكافِئ سلوكَ المسار الذي يتطلَّب أقلَّ وقتٍ ممكن. لكن هذا المبدأ يظل سارياً بغضِّ النظر عن الاتجاه الذي يَسلُكه الضوء، سواء انطلق من العين أو إليها. وفي كثيرٍ من الحالات، يُمكِن التفكيرُ في الضوء على أنه يَسلُك مَساراً كالشعاع، ولا يُمكِننا تحديدُ الطريق الذي يَسلُكه بشكلٍ فعلي؛ وذلك لأنه ينتقل بسرعةٍ كبيرة جداً، بحيث يستحيلُ علينا رصْدُ أيِّ حركةٍ له على طول المسار، كما أن الاتجاهَيْن المحتمَل أن يَسلُكَهما الضوءُ هما اتجاهان مُتكافِئان هندسياً. في أواخر القرن الخامس عشر، كان ليوناردو دافنشي Leonardo da Vinci متفقاً مع وجهةِ نظرِ أفلاطون بصورةٍ مبدئية، لكنه غيَّرَ رأيَه بعدَها ليَخْلص إلى أن الأشعةَ لا تَنبعثُ من العين على الإطلاق. ولكن، إن كان الضوء يَسقُط على العين، فإن الآلية التي تتكوَّن بها صورُ الأشياء كي نراها لم تزل مُحاطةً بالغموض، وهذه المسألةُ ناقَشَها العالِمُ والرياضي ابنُ الهيثم بشغَفٍ عظيمٍ في القرن الحادي عشر. وعرَفَ الغربُ أعمالَ ابن الهيثم من خلالِ كتاباتِ جون بيكهام John Peckham في القرن الثالث عشر، ولم يَجْرِ تطويرُها بشكلٍ يُذكَر إلى أن جاء يوهانس كبلر بعد 600 عام.

يَحْظى كبلر بتقديرٍ واسع لما حقَّقَه من إنجازاتٍ عديدة، على رأسها اكتشافُ أن مَداراتِ الكواكب (وبالتبعية، الأَجْرام السماوية الأخرى) بيضاويةُ الشكل وليستْ دائرية. نشَرَ كبلر أولَ قانونَيْن من قوانين الحركة الكوكبية في كتابه «علم الفلك الجديد» (*Astronomia nova*) في عام 1609، ونشر بعد ذلك قانونَه الثالث، الذي ينصُّ على أن سُرعاتِ الكواكب في مَداراتها هي دالةٌ للمسافة بينها وبين الشمس، وذلك في كتاب «تناغُم العالَم» (*Harmony of the World*) في عام 1618.[16]

سنناقش، بما يتفق مع موضوعِ هذا الكتاب، إنجازاتٍ أخرى تَشهَدُ على عبقريةِ كبلر. كان كبلر على الأرجحِ أولَ مَن تحدَّث عن الإكليل الشمسي، وذلك في كتابه المنشور عام 1606، وتناوَلَ فيه المستعر الأعظم الذي لم يزل يَحملُ اسمَه. ومع ذلك، فإن عملَ كبلر في مسألةِ الرؤية هو

الأشهر. ففي عام 1604، اكتشف كبلر أن العينَ جهازٌ بصري، وأن صورة حقيقية تَسقطُ على الجزء الخلفي من العين بواسطةِ عدسةٍ تقع قُربَ حَدَقة العين. ولكن، نظراً للطريقة التي تَعكسُ بها العدساتُ الصورَ، فإن تلك الصورةَ المُسقَطة تبدو مقلوبة. في وقتِنا الحالي، لا نجدُ صعوبةً في تقبُّلِ فكرةِ أن الدماغَ البشري يَقلبُ الصورَ التي يتلقَّاها تلقائياً، ممَّا يَسمحُ لنا برؤيةِ الأشياء في وضْعِها الصحيح، وبما يتوافق مع اتجاهِها الفعلي. [17]لكن هذه الفكرةَ كانت مَثاراً للجدلِ في زمن كبلر؛ الأمر الذي دفَعَه إلى الدخول في نقاشٍ مُطوَّل طرَحَ فيه حجةً (تقوم في معظمِها على أُسسٍ دينية) تقول إن قلبَ اتجاهِ الصورة أمرٌ منطقي. واتفق عالِمُ الفلك اليسوعي كريستوفر شاينر Christopher Scheiner مع كبلر في رأيه، مرةً في عام 1619 في كتابه «أوكولوس» (*Oculus*)، ومرةً أخرى بعدَ مرورِ عَقْدٍ، في كتابٍ عن البُقَع الشمسية بعنوان «روزا أورسينا» (*Rosa ursina*)، لكن الفكرةَ لم تَرُقْ للجميع آنذاك. كان بيير غاسندي Pierre Gassendi 1655 - 1592))، وهو أول مَن رصَدَ عبورَ كوكبِ عُطارِد أمام الشمس، أحدَ المعارِضين للفكرة. كان غاسندي وآخَرون يرون أنه يجب أن تكونَ هناك مِرْآةٌ في مكانٍ ما في العين مسؤولةٌ عن إعادةِ قلبِ الصورة بحيث تبدو في الوضعِ الصحيح.

السلوك المَوْجي للضوء

أظهرتْ نظريةُ هوغنس عن مَوْجاتِ الضوء لعام 1678 - وهي النظريةُ التي تتضمَّن انتشارَ الضوء عبر وسَطٍ في شكلِ موجاتٍ متكررة ذات مقدمات كروية (أو دائرية عند تمثيلها تمثيلاً ثنائي الأبعاد) - أن الضوءَ ينتشر بعد مروره عبر شقٍّ ضيِّق. وتُظهِر تجرِبةٌ شهيرة منسوبة إلى العالِم الموسوعي الإنجليزي توماس يونغ Thomas Young أجراها في عام 1803، أن الضوءَ يَسلُك سلوكَ الموجات. سلَّطَ يونغ الضوءَ على شَقَّيْن متجاوِرَيْن بحيث انتشر الضوءُ خارجاً من كل شَقٍّ، وأدَّى هذا إلى ظهورِ نمطِ تداخُل على حاجزٍ موضوعٍ خلف الشَّقَّيْن. وأوضَحَ ذلك أن مقدمةَ موجةٍ واحدة كانت تصطدمُ بالشَّقَّيْن فينتجُ عنها مصدران للضوء ينتشران بشكلٍ دائري ويتفاعلان معاً بعدَ الخروج من الشَّقَّيْن. لم تستطِعْ نظريةُ نيوتن الجُسَيمية للضوء تفسيرَ مثل هذا التداخُل. وفي عام 1815، قدَّمَ أوغستان فرينل Augustin Fresnel - المشهورُ اليومَ بتصميمِه الذي وفَّرَ في وزنِ العدسات المستخدَمة في المنارات وسُمْكها - دليلاً رياضياً يَدعمُ تجرِبة الشَّقِّ المزدوج التي أجراها يونغ.

السلوك الجسيمي للضوء

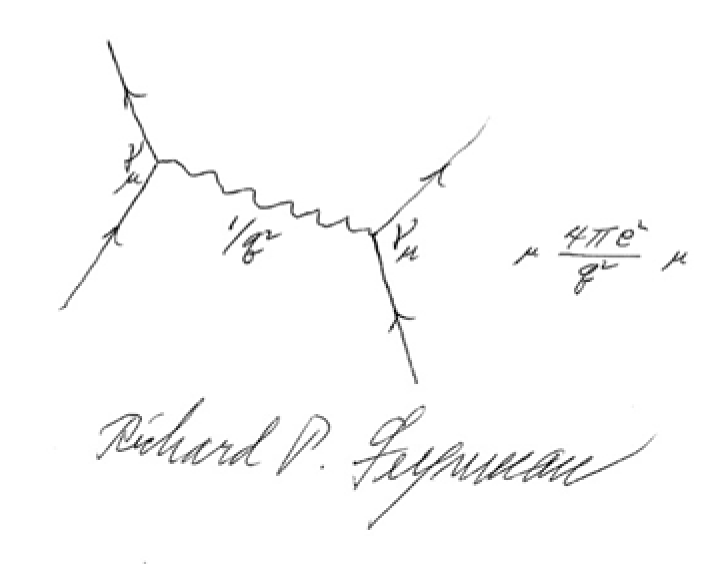
تمخَّضتْ دراساتُ الضوء في القرنِ التاسعَ عشرَ عن قوانينَ أساسيةٍ ما زال علماءُ الفلك يستخدمونها اليومَ. ويوضِّح قانون فين Wien للإزاحةِ أنَّ ذُروةَ قوةِ الإشعاع - أي الطول الموجي الذي يصلُ عندَه انبعاثُ الضوء من جسمٍ ساخن إلى أقصى قُوَّته - تعتمدُ على درجةِ حرارة الجسم الباعث للضوء، ويتناسب الطولُ الموجي للذُّرْوة عكسياً مع درجةِ الحرارة. وأظهَرَ

قانون ستيفان- بولتزمان Stefan- Boltzmann أن الطاقةَ الكلية المنبعثة من جسمٍ ساخن تتناسبِ طردياً مع القوة الرابعة لدرجةِ حرارته المطلَقة؛ ومن ثَم، فإن مُضاعَفةَ درجةِ الحرارة تزيد الطاقةَ المنبعثة بمقدار 2 × 2 × 2 × 2 = 16 مرة.

وفي مَطْلع القرن العشرين طرَحَ ماكس بلانك Max Planck في ألمانيا صيغةً فسَّرتْ كلاً من قانونِ فين للإزاحة وقانونِ ستيفان- بولتزمان. وفي أثناء عملِ بلانك على صيغته، اكتشَفَ أن عليه استخدامَ المفهوم الرياضي المعروف بحُزَم الطاقة، أو الكَمَّات، وذلك على الرغم من أنه لم يَعتقِد أن هذه الحُزَم حقيقية. ولم تتغيَّر تلك الفكرة إلا بقدومِ ألبرت أينشتاين عندما طرح النظريةَ النسبية الخاصة في عام 1905، وفسَّرَ حركاتِ الجُسَيمات الدقيقة في السوائل فيما عُرِف بالحركة البراونية، ليُثبِت أن حُزَمَ الطاقة حقيقيةٌ. ودعم أينشتاين الفكرةَ القائلة بأن هذه الكَمَّاتِ من الطاقة تؤلِّفُ جُسَيماتِ الضوء المسمَّاة بالفوتونات، وأن طاقتَها (ورمزها E) تتناسب عكسياً مع طولها الموجي الظاهري (ورمزه λ) كما يتَّضِح من المعادَلة (E = hc/λ). تَجمعُ هذه المعادلةُ بين مضاعفٍ ثابت (يُرمَز له بحرف h) يُعرَف بثابت بلانك، وسرعةِ الضوء (ويُرمَز لها بالحرف c). لقد كان لهذا العمل الذي فسَّرَ التأثيرَ الكهروضوئي الفضْلُ في فوزِ أينشتاين بجائزة نوبل لاحقاً.

بعد إجراء نيلز بور Niels Bohr بعضَ الأبحاث التمهيدية في عام 1913، وما تلا ذلك من صياغةِ قواعدِ ميكانيكا الكم فعلياً على يدِ إرفين شرودنغر Erwin Schrödinger وفيرنر هايزنبرغ Werner Heisenberg في عشرينيات القرن الماضي، أضحتْ ميكانيكا الكَم إحدى النظريات الرئيسة التي تَحكُم علمَ الفيزياء. لكن النظريةَ النسبية العامة لأينشتاين، التي وضَعَها عام 1915، لا تتضمَّنُ أفكاراً كمومية؛ ولذا فنحن عاجِزون عن الجمْع بين ميكانيكا الكَم والنسبية العامة، وهو ما يعني أن النظريتَيْن غيرُ مكتمِلتين. وما زال السعي إلى الربط بين النظريتَيْن، أو جَمْعهما معاً، مستمراً حتى يومنا هذا.

يُمكِنُنا فَهْمُ تفاصيلِ الآلية التي ندرك بها الأشياء، والتفاعُلِ بين الضوء والمادة بصورةٍ أفضلَ في ضوءِ نظرية الديناميكا الكهربائية الكمية التي ظهرت فيما بعد. شرح ريتشارد فاينمان Richard Feynman النظريةَ في سلسلةِ مُحاضَراتٍ بعنوان «الديناميكا الكهربائية الكَمية: النظرية الغريبة للضوء والمادة»، وذلك باستخدامِ طريقتِه التخطيطية لتتبُّع التفاعُلات، والمعروفة بمخطَّط فاينمان (انظر الشكل 31).



31- مخطَّطٌ يوضِّح الجُسَيمات (في هذه الحالة نيوترينوات الميون)، رسَمَه البروفيسور فاينمان بناءً على طلبٍ من أحدِنا (جاي ميرون باساتشوف) ليُبيِّنَ لنا كيف يبدو المخطَّط. نرى في المخطَّط جُسَيمَيْن (يمثِّلهما السهمان على اليسار واليمين) يتفاعلان عبرَ جسيمٍ متبادل وسيط (يمثِّله الخط المموج في المنتصف).

الطيف: الضوء وما وراءه

لطالما عرفَ سكانُ الأرض الطيفَ؛ إذ يظهر أمامَنا بصورةٍ طبيعية على شكلِ قوسِ قُزَح. تقع أطيافُ قوسِ قُزَح في السماء في مُواجَهة الشمس، وتتشكَّل عندما ينعكس ضوءُ الشمس وينكسر داخلَ قطراتِ المطر. كان الفيلسوفُ وعالِمُ الرياضيات رينيه ديكارت René Descartes (1596 - 1650)) أولَ مَن فسَّرَ ظاهرةَ قوسِ قُزَحٍ وأرجَعَها إلى انعكاسِ الضوء وانكسارِه داخلياً بواسطةِ قطراتِ المطر؛ إذ يَخرجُ منها الضوءُ بزاويةٍ معيَّنةٍ بالنسبة إلى مصدر الضوء. وبعد ذلك، يَخرج الضوءُ المنكسر من سحابةِ القطرات في شكلِ مخروطٍ ضيِّق بتلك الزاوية ويشكِّل هالةً كبيرة حولَ الاتجاهِ المؤدِّي إلى مصدر الضوء. تنكسر الألوانُ المختلفة بزوايا متفاوتة قليلاً، كما هو الحال في موشورات نيوتن، ممَّا يؤدي إلى انفصالِها انفصالاً طفيفاً في الهالة كي تشكِّلَ أقواساً متجاوِرةً ومتَّحدةَ المركزِ لها ألوانُ قوسِ قُزَح.

لاحِظْ أن ألوانَ قوسِ قُزَحِ الرئيس تَظهر بالترتيب المعروف من الخارج إلى الداخل. وفي بعض الأحيان، كما في الرسم الإيضاحي، يَظهر قوسُ قُزَحٍ ثانويٌّ يحدث فيه انعكاسٌ إضافي داخلَ قطرات المطر. وفي هذا القوس الثانوي، يتسبَّب الارتدادُ الإضافي في ظهورِ الألوان نفْسِها ولكن بترتيبٍ معكوس.

يختلفُ الانعكاسُ والانكسارُ اختلافاً كبيراً فيما يتعلق بقُدْرتهما على إحداثِ طيفٍ. ينعكس الضوءُ بكل أطواله الموجية عندما يصطدم بسطحٍ ما، وتكون زاويةُ الانعكاس هي نفسها زاوية سقوطِ الضوء على هذا السطح. ومن ثَم، لا ينتجُ عن الانعكاس أيُّ تأثيراتٍ لونية. ولهذا السبب تكون المرايا العاكسةُ خياراً أفضلَ في التلسكوبات من العدسات إذا كنتَ بصددِ النظر إلى أجرامٍ تنبعث منها تشكيلةٌ واسعة من الألوان، وتريد أن تتركَّزَ الألوانُ كلُّها بالطريقة نفسها.

لكنَّ الانكسارَ يختلف عن ذلك تماماً، ويجسِّده ما يَحدث عند سقوطِ ضوءٍ أبيضَ على موشور، كما في الشكل 33. إن سرعةَ مرورِ الضوء عبر الزجاج أو البلاستيك أبطأُ من سرعةِ مروره في الهواء (وهذه السرعةُ بدورها أبطأُ قليلاً من سرعةِ مرورِ الضوء في الفراغ - أو ما يُسمَّى الفضاءَ الخالي - والتي يَرمز لها أينشتاين بالسرعة c). وتعتمد سرعةُ مرورِ الضوء عبر أيِّ مادةٍ على الطول الموجي للضوء.



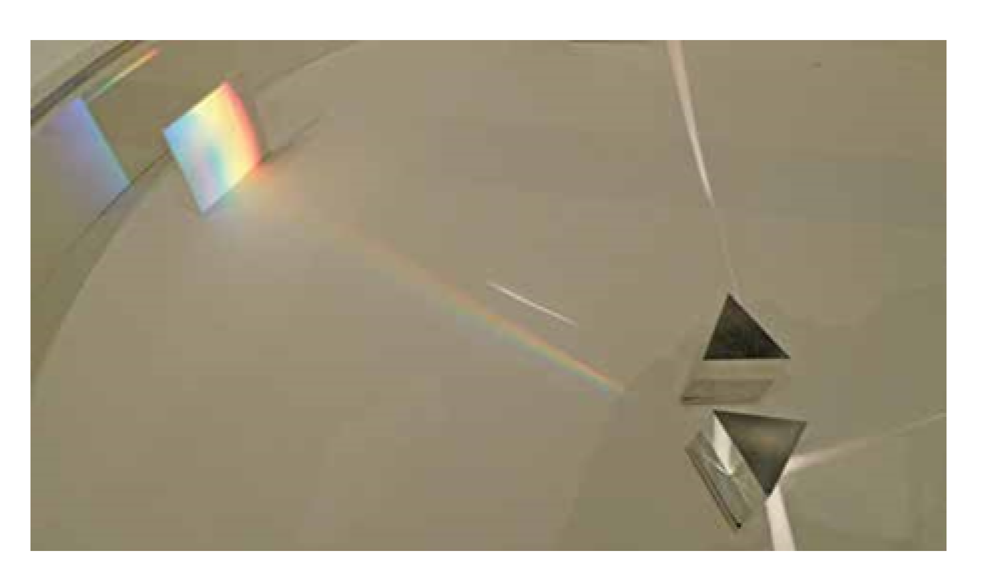
32- تَشيع رؤيةُ أقواس قزح في هاواي؛ نظراً لأن الهواء هناك غالباً ما يَحملُ قطراتِ مطرٍ أو ضباباً. يظهر جزءٌ من قوس ثانوي في أسفلِ يسارِ الصورة.

ومن ثَم، عندما يمرُّ شعاعُ الضوء عبر الموشور، فإنه يَنحرف بمقدارٍ يتناسب مع لونه، ويَخرج من الموشور على هيئةِ شعاعٍ متخذاً أحدَ ألوانِ قوسِ قُزَح.[18]

إن إشعاعَ شمسنا يكون في ذُروةِ قُوَّته في الجزء الأصفر والأخضر من الطيف، ولا شكَّ في أن أعيُنَنا تطوَّرتْ بحيث تكون أكثرَ حساسيةً لهذا النطاق. وفي الجزء الذي نسمِّيه الجزء «المرئي» أو «البصري» من الطيف، يُمكِننا رؤيةُ الألوان من الأحمر إلى البنفسجي. ولا تفرِّق أعينُنا بين الأطوال الموجية مهما طالتْ أو قَصُرت. في الواقع، إن معظم الأطوال الموجية الأقصر لا تصِلُنا عبر الغِلاف الجوي للأرض. سنرى في الفصل السابع إلى أيِّ مدى تخترقُ الأطوالُ

الموجية المختلفة للإشعاع الصادر عن النجـوم والأجرام السماوية الأخرى غِلافَنا الجويَّ قبل امتصاصها. ولا يصِلُ الإشعاعُ السماوي إلى سطح الأرض إلا عبـر المناطقِ التـي نُطلِق عليها اسمَ نوافذ الشفافية. وتوجد إحدى تلك النوافذ في الجزء المرئي من الطَّيْف، وتوجد نافذةٌ في الجزء الراديوي منه، كما توجد بعضُ النوافذ الضيّقة في جزءِ الأشعة تحت الحمراء الأقرب إلـى الحد المرئي. تحتوي العينُ البشرية على نوعَيْن من أجهزةِ الاستشعار. وتُسمَّى الأجهزةُ الأكثر حساسيةً بالعصِيِّ نسبةً إلى شكلها. لكنَّ العصِيَّ لا تُدرِك إلا ما نفسِّره بالأبيض والأسود. أمَّا الأجهزةُ الأقلُ حساسيةً والأكثرُ قُدرةً على تمييزِ الألوان على الطيف فتُعرَف بالمخاريط اللونية.

يوجـد الضوء فـي الطبيعة بأطوالٍ موجيـة مختلفة، ولكـن لا يوجد شـيءٌ يرتبط ارتباطاً مباشراً بـ «اللـون». ولكي نرى اللون، يجب أن يَحدُثَ تفاعُلٌ في الدماغ بين الإشارات الواردة من العصِيِّ والمخاريط في شبكيةِ العين، وأن تُصدِرَ المخاريطُ بدورها إشاراتٍ تفيد بوجودِ تبايُنٍ في الألوان. لدى البشرِ ثلاثةُ أنواعٍ من المخاريط، حسَّاسة بصورةٍ عامة تجـاهَ الألـوان الأحمـر والأخضـر والأزرق علـى التوالـي.



33- موشور يشتِّت شعاعاً ساقطاً من الضوء الأبيض، كما هو واضحٌ في أسفلِ يمينِ الصورة، إلى ألوانِ قوسِ قُزَح. (انظر الشكل 30 لفَهْمِ طريقةِ عملِ الموشور الثاني الذي لم يُوضَع في مسارِ الضوء في هذه التجرِبة).

عندمـا يسـقط الضوءُ علـى المخاريط، فإنها تُفرِز بروتيناً يُسمَّى الأوبسين، وجُزَيْئاً يُسمَّى حامـل اللـون. أمَّا العصِيُّ فتستشعرُ الأبيضَ والأسود، وتنتج صوراً أدقَّ لكنها أحاديةُ اللون عندما تُفرِز صباغ الرودوبسين pigment rhodopsin. تؤدِّي هذه التفاعُلات الكيميائية إلـى إنتاجِ إشاراتٍ كهربائية مُناظِرةٍ لكل لون. وتحتوي شبكيةُ العين على وصلاتٍ ودوائرَ معقَّدةٍ تحلِّل تلك الإشارات، مع مراعاةِ تبايُن الصورة واكتشافِ الحَوَاف. وتنتقل إشاراتُ شبكيةِ العين بعد مُعالَجتها إلى القشرة البصرية التي تَشهَد تنفيذَ مهمةٍ لا تقلُّ تعقيداً عن العمليات السابقة؛ ألا وهي مهمةُ تفسيرِ إشارةِ الصورة.

الطَّيْف الشمسي

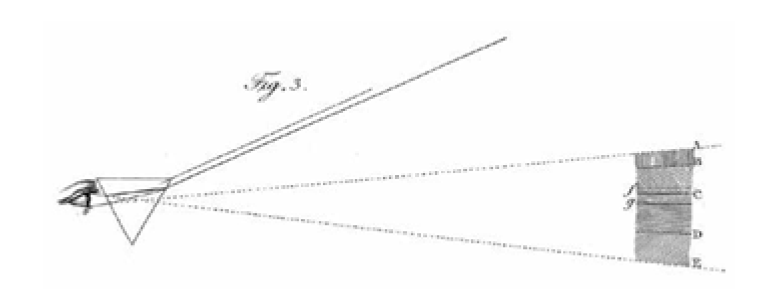
شهِدَ عِلمُ البصريات العديدَ من التطوُّرات خلال الفترة بين اكتشافِ نيوتن طَيْفَ ضوءِ الشمس في القرن السابع عشر وحتى أوائل القرن التاسع عشر. لكن التصويرَ الفوتوغرافي لم يكُن قد اخْتُرِع بعدُ؛ لذا كانت جميعُ الملاحظات العلمية ملاحظاتٍ عينيةً، وكان لا بدَّ من رسْمِها أو وصفها، وتَمحوَرَت جُلُّ المناقَشات التي تلَتْ ذلك حولَ الاختلافِ بين الخواصِّ الفيزيائية للضوء وإدراكِنا له. هناك صلةٌ بين الأمرَيْن، لكنَّ الصراعَ من أجل الفصل بين الخواصِّ الموضوعية للضوء وخواصِّه الأخرى التي تعتمد على الجهاز الإدراكي البشري لَطالما كان صِراعاً طويلاً وصعباً.

لم يَرَ نيوتن أيَّ تبايُناتٍ في الطَّيْف غير ذلك الحزامِ الممتدِّ من الألوان. ولكن في عام 1802، كشف وليام هايد ولاستون William Hyde Wollaston في إنجلترا أن الطيفَ البصريَّ للشمس ينقسمُ إلى أربعةِ أجزاءٍ وليس سبعة (الشكل 34). كان إنجاز ولاستون الرئيس هو الحصول على مُشاهَداتٍ أفضلَ بشكلٍ كبير للطيف الشمسي، واكتشاف خطوطِ امتصاصٍ قوية وداكنة. وربما يُعزَى هذا التحسُّن في المُشاهَدات إلى استخدامِ ولاستون شَقًّاً ضيِّقاً يمرُّ عبْرَه شعاعٌ من ضوء الشمس إلى الموشور، وذلك بدلاً من استخدامِ الصورة الشمسية بأكملها، وهي التقنية التي من شأنها أن تؤدِّيَ إلى ظهورِ أطيافٍ متداخلة تداخلاً شديداً يَحُول دونَ رؤيةِ التفاصيل بوضوح. حقَّقَ ولاستون، وهو طبيبٌ اتَّجَه إلى دراسةِ الكيمياء والفيزياء التجريبية، ثروةً من اختراعِه عمليةً - أَبْقاها سراً معظمَ حياته - مكَّنَتْه من إنتاجِ البلاتين المِطْواع من خام البلاتين، وهي العمليةُ التي اكتشف خلالَها عنصرَ البالاديوم. شكَّلتْ دراساتُ ولاستون البصرية جزءاً صغيراً من عمله البحثي اليومي، ولكن كان لها نصيبُ الأسد من أعماله المنشورة. وفيما يتعلَّق بدراسة الطيف الشمسي، كتب ولاستون، في العدد الصادر عام 1802 من دورية «المداولات الفلسفية للجمعية الملكية» *Philosophical Transactions of the Royal Society* يقول:

لا أستطيع أنْ أختتمَ هذه الملاحَظاتِ حول التشتُّت دونَ الإشارةِ إلى أنني لا أعتقد أن عددَ الألوان التي يُمكِن فصلُ شعاعِ الضوء الأبيض إليها عن طريقِ الانكسار هو سبعةُ ألوان فقط، كما تَظهر عادةً في قوسِ قُزَح. ولا أعتقد أيضاً أن عددَ هذه الألوان يُمكِن اختزالُه بأي طريقةٍ (على حسب علمي) إلى ثلاثةِ ألوان، كما تصوَّرَ البعض. ولكن، عند النظر إلى شعاع رقيقٍ من الضوء، يُمكِننا رؤيةُ أربعةِ أقسام أولية من الطيف الموشوري، وتتمايز هذه الأقسامُ فيما بينها بدرجةٍ لا أعتقد أن أحداً وصَفَها أو رصَدَها من قبلُ.

تستمر القصة مع جوزيف فراونهوفر Joseph Fraunhofer، الذي تيتَّمَ في الحادية عشرة من عمره في عام 1798. فبينما كان فراونهوفر يعملُ متدرباً في مصنعٍ للزجاج، انهار مكانُ عمله وانتهى به الأمر مدفوناً تحتَ الأنقاض، وأخَذَ الموقفُ مُنعطفاً لا يُصدَّق، لكنه حدَثَ بالفعل، عندما أنقَذَه فريقٌ بقيادة أمير بافاريا، الذي أصبح راعياً لفراونهوفر بعد ذلك. وفي نهاية المطاف، حصل

فراونهوفر على وظيفةٍ في مصنعٍ للزجاج في دير بنديكتي سابق، وهي قصةٌ رَوَاها نيل ديغراس تايسون Neil deGrasse Tyson بالتفصيل في الحلقة الخامسة من برنامجه «الكون: ملحمة زمكانية» *Cosmos: A Spacetime Odyssey* في عام 2014، وهو نسخةٌ جديدة من برنامج «الكون: رحلة شخصية» *Cosmos: A Personal Voyage*، الذي قدَّمه كارل ساغان Carl Sagan في عام 1980.



34- في عام 1802، كتب ولاستون: «الخط A الذي يحدُّ الجانبَ الأحمر من الطيف غائمٌ إلى حدٍّ ما، ويبدو أن هذا يرجعُ جزئياً إلى قصورٍ في قُدرةِ العين على تجميعِ الضوءِ الأحمر. أمَّا الخط B، الواقعُ بين الأحمر والأخضر، في موضعٍ معيَّن من الموشور، فيبدو واضحاً تماماً. وينطبق الأمرُ نفْسُه على الخطَّيْن D وE، وهما حَدَّا اللون البنفسجي. لكن الخط C، الذي يَحدُّ اللونَيْن الأخضر والأزرق، ليس واضحاً كالبقية، كما يوجد على كلِّ جانبٍ من جانبَيْ هذا الحدِّ خطان آخَران داكنان وواضحان، وهما f وg، وقد يظن الباحث خطأً أنهما يحدان هذَيْن اللونَيْن إنْ كانت التجرِبةُ غيرَ مُحكَمة».

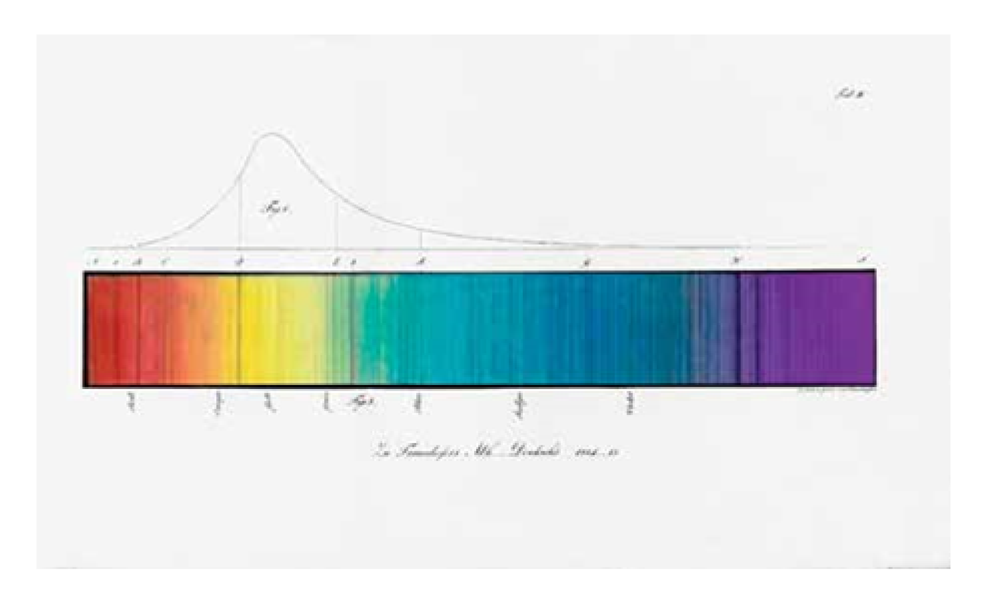
Philosophical Transactions of the Royal Society of London, lxxxxii)
.((1802), pp. 365- 80

وكان الدير الذي عمل فيه فراونهوفر هو الدير نفسه الذي عُثِر فيه على المخطوطةِ الجريئة التي تعود إلى القرن الثالث عشر، والمعروفةِ باسم «كارمينا بورانا»، واستخدَمَها الملحِّن كارل أورف Carl Orff في القرن العشرين.

اخترع فراونهوفر أدواتِ قياسٍ، من بينها المِطْياف، بهدفِ دراسةِ خواصِّ الزجاج العالي الجودة الذي يصنعونه. وبعدَ أن وجَدَ فراونهوفر خطاً أصفرَ برتقالياً لامعاً عبرَ طيفِ اللهب (معروفٌ الآن أنه ناتجٌ عن وجود الصوديوم)، وجَّهَ المِطْيافَ نحوَ الشمس. ومما أثار دهشتَه أنه رصَدَ العديدَ من الخطوط الداكنة على الطيف الشمسي، وهو الأمر الذي أفاد الأجيالَ التالية. هذه الخطوطُ داكنةٌ - أي أنها امتُصَّت بحيث صارت أقلَّ سطوعاً من بقية الألوان - ولذلك تُسمى خطوطَ الامتصاص. واليومَ، نسمِّي تلك الخطوطَ باسمِ خطوط فراونهوفر (الشكل 35).

في رسْمِ فراونهوفر التخطيطي الأصلي، رَسَمَ 574 خطَّ امتصاصٍ، ورمَزَ إلى الخطوط الأقوى فيها بالأحرف الكبيرة من A إلى H، تتخلَّلها أحرفٌ صغيرة ومنخفضة تَرمز إلى الخطوط الأضعف. واستخدَمَ فراونهوفر الحرفَ الكبير I للإشارة إلى نهاية الطيف. ما زلنا نستخدمُ تلك

الحروف لنشيرَ بها إلى خطوطِ فراونهوفر. واليومَ نعلم أن الخطّيْن A وB ناتِجان عن الامتصاص في الغِلاف الجوي للأرض، وليس من الشمس. والخط C ينتج عن وجود الهيدروجين في الغِلاف الضوئي للشمس، وهو الطبقةُ المرئية من غِلافها الجوي (أي السطح الكروي الذي نحصلُ منه على الصور). الخطُّ D هو في الواقع زوْجٌ من الخطوط المتقارِبة، وناتجٌ عن امتصاصِ الصوديوم، ويُمكِن رؤيتُه بالعين المجردة باللون الأصفر الفاتح أو البرتقالي عند إلقاء الملح (ورَمْزه الكيميائي NaCl) في اللهب.



35- الرسم التخطيطي الأصلي لفراونهوفر، من عام 1814، (نُشِر على صورةِ نقشٍ أبيض وأسود في عام 1817 ولُوِّن هنا). رسَمَ فراونهوفر فوق الطيف منحنى للسطوع الكلي للإشعاع الشمسي، موضِّحاً أنه بلَغَ ذُروتَه عند اللون الأصفر، وانخفَضَ عند الأطوال الموجية الأقصر والأطول.

ومن الواضح أن الخط H هو فردٌ من زوج، وأشارَ العالِمُ الفرنسي إليوتير مانسكار Éleuthère Manscart في عام 1863 إلى الخطِّ الآخَر بالرمز K، وذلك على الرغم من أن معظم العلماء ما زالوا يظنون بطريقِ الخطأ أن فراونهوفر هو مَن استخدم هذا الرمز. الخطَّان H وK هما الأقوى من بين خطوطِ فراونهوفر، ويَنتج الخطان عن امتصاصِ الكالسيوم المتأيِّن في الغِلاف الجوي للشمس. وعلى الرغم من أن معدلَ الهيدروجين في الغِلاف الجوي الشمسي يَفُوق معدلَ الكالسيوم بكثير، فإن أقوى خطوطِ الهيدروجين تقع في أعماقِ منطقةِ الأشعة فوق البنفسجية، وهي أشعةٌ لا يُمكِن رؤيتُها من سطح الأرض؛ لأنها لا تخترق غِلافَنا الجوي. أمَّا الخط C المرئي، والمعروف باسم هيدروجين ألفا (Hα)، فهو ينتمي إلى مجموعةٍ ثانوية من الخطوط الطيفية للهيدروجين. وتقديراً لاكتشافاته، أصبح فراونهوفر من النبلاء في عام 1824، وأُضِيف لقبُ «فون» إلى اسمه.

نعلمُ الآن، بل ومنذ اللحظة التي تأمَّلَ فيها فراونهوفر طيفَ نَجْمٍ واحد، أنَّ جميعَ النجوم لديها خطوطُ فراونهوفر. وتساعد هذه الخطوطُ الفلكيِّين في استنتاجِ درجاتِ الحرارة وشدةِ الضغط على

أسطُح النجوم. لقد أسهَمَ عِلمُ الأطياف، الذي انبثق من دراسات ولاستون وفراونهوفر، في تطويرِ علمِ الفلك الذي سادَ خلال الألفية الماضية ليُصبحَ علمَ الفيزياء الفلكية الذي عرفناه في القرنَيْن العشرين والحادي والعشرين، ويعود الفضْلُ في ذلك إلى حدٍّ كبير إلى عملِ العالِمَيْن الألمانيَّيْن غوستاف كيرشوف Gustav Kirchhoff وروبرت بنسن Robert Bunsen.

نحو الفيزياء الفلكية

لن تُساعِدَك رؤيةُ خطوطٍ داكنة في أطياف الشمس والنجوم الأخرى وَحْدها في معرفةِ سببِ ظهورِ هذه الخطوط. ولقد طرح الفيلسوف أوغست كونت Auguste Comte تنبؤاً خاطئاً للغاية عندما كتب ما يلي في عام 1842:

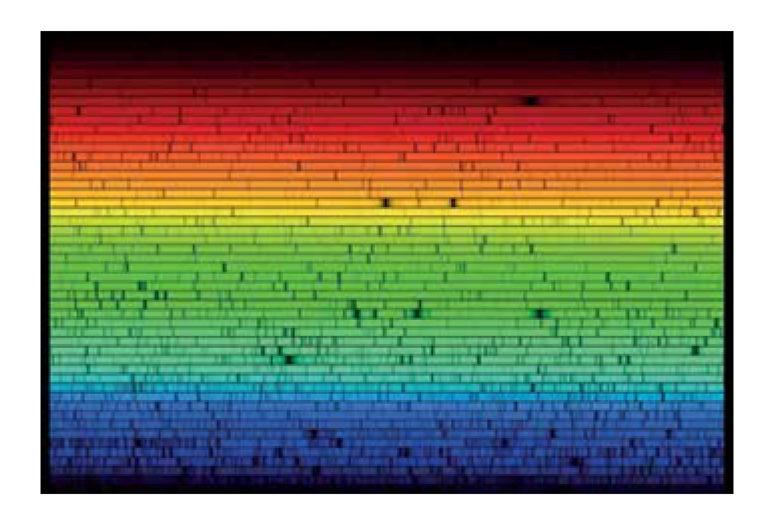
تندرجُ الكواكبُ تحت الفئة الأقل تنوُّعاً مُقارَنةً بجميع الأجرام. فنحن نعرفُ طريقةَ تحديدِ أشكالِ الكواكب، ومَسافاتها، وكُتَلها، وحَركاتها، لكنْ لا يُمكِننا أبداً معرفةُ أيِّ شيءٍ عن بِنْيتها الكيميائية أو المعدنية. والمعلوماتُ التي لدينا، حول ما إذا كانت هناك كائناتٌ منظَّمة تعيش على سطحها، منعدمةٌ تقريباً.

كان الأملُ الذي علَّقه كونت على فَهْم النجوم أقلَّ من ذلك الذي علَّقه على فَهْم الكواكب. لكنْ بعدَ وقتٍ قصير من طرْحِه هذا التوقُّع، أثبت بنسن وكيرشوف أنه كان مُخطِئاً للغاية.

طوَّر غوستاف كيرشوف (1824- 1887) فكرةَ خطوط فراونهوفر، وتعاوَنَ في هايدلبرغ بألمانيا مع روبرت بنسن (1811- 1899) في تجارِبَ طيفيةٍ اختصَّتْ بدراسةِ الضوء المنبعث من الغازات الساخنة. وتمكَّنَ كيرشوف وبنسن من رصْدِ العديد من الخطوط الطيفية في ضوء الغاز المتوهِّج، وربْطِها بالعناصر التي تُنتِج الضوء، ووجد العالِمان أنَّ لكل عنصرٍ مجموعتَه الفريدة من الخطوط الطيفية التي يُمكِن أن نعُدَّها بصمةً كيميائية للعنصر. ولم يَكَدِ العالمان ينتهيان من ذلك حتى استخدما التحليلَ الطيفي مرةً أخرى ليكتشفا عنصرَيْن كيميائيَّيْن جديدَيْن، وهما السيزيوم والروبيديوم، في عام 1861. استخدَمَ بنسن في عملهما الموقدَ الجديد آنذاك، والمسمَّى على اسمه. لكن الموقدَ لم يكُنْ إنجازَه الأكبر؛ إذ طوَّرَ أيضاً ترياقاً للتسمُّم بالزرنيخ أنقَذَ حياتَه عندما انفجَرَ مُركَّبُ زرنيخ في مَخْتبره، الحادث الذي أدَّى إلى إصابته بالعمى في إحدى عينَيْه وكاد أن يسمِّمَه. اخترع بنسن أيضاً بطاريةَ الزنك والكربون، وحلَّلَ أيضاً العادمَ الذي كان يَخرج من الأفران الصناعية في ألمانيا والمملكة المتحدة لإثبات أن تلك الأفرانَ تُهدِر كمياتٍ هائلةً من الطاقة، ممَّا أدى إلى إعادةِ النظر في الوضع؛ ومن ثَم تحسين المُعَدات بشكلٍ كبير. واستخدَمَ

بنسن موقدَه الشهير لتوفيرِ شعلةٍ عديمةِ اللون تقريباً لتسخينِ عيناتٍ مختلفة من المواد التي أراد هو وكيرشوف دراسةَ أطيافها دونَ تدخُّلٍ من أيِّ خطوطٍ طيفية تخصُّ الشعلةَ نفْسَها.

اكتشف كيرشوف طريقةً لتحديدِ ما إذا كانت الخطوطُ الطيفية ستظهر على صورةِ خطوطِ امتصاصٍ (كما في حالة خطوط فراونهوفر الداكنة في الشمس والنجوم)، أم على صورةِ خطوطِ انبعاثٍ، بمعنى أنها ستكون أكثرَ سطوعاً من الألوان المحيطة بها. ووجَدَ أنَّ مظهرَ الخطوط مرتبطٌ بدرجةِ الحرارة النسبية لمصدرَي الإشعاع في الخلفية والمقدمة؛ إذ يتأثَّرُ ما نراه بطبيعةِ المادة الموجودة بيننا وبين مصدر الضوء. وصاغَ كيرشوف ثلاثةَ قوانينَ لعلم التحليل الطيفي يفسِّرَ بها ما رصَدَه من مُشاهَدات: ينصُّ القانونُ الأول على أنَّ أيَّ جسمٍ جاسئ (أو عالي الكثافة) ساخن ينتج ضوءاً ذا طيفٍ مستمر. وسَكَّ كيرشوف مصطلحَ «إشعاع الجسم الأسود» لوصْفِ العلاقة البيانية الأساسية بين إشعاع مثل هذا المصدر الحراري - أيْ شِدَّة الضوء عند أطوالٍ موجية مختلفة - ومصادرَ أخرى تتفاوت فيما بينها من حيث درجات الحرارة. وينصُّ القانون الثاني على أن أيَّ غازٍ ساخن ضعيف ينتج ضوءاً له خطوطٌ طَيْفية ذات أطوال موجية منفصلة، وتعتمد الأطوالُ الموجية للخطوط على التركيب الكيميائي للغاز. وينص القانونُ الثالث على أن أيَّ جسمٍ جاسئ ساخن مُحاطٍ بغازٍ ضعيف بارد يُنتِج ضوءاً ذا طيفٍ مستمر به فجواتٌ بأطوالٍ موجية منفصلة، ويقصد بالأطوال الموجية المنفصلة خطوط الامتصاص المقابلة لخطوطِ الانبعاث التي يُنتِجها هذا الغازُ عند تسخينه. فسَّرتْ هذه القوانينُ طبيعةَ مصادرِ الأطياف التي يُمكِن رصْدُها في الضوء المنبعث من النجوم البعيدة. وأدرك كيرشوف أيضاً، بالتفكير في الطريقة التي تبعث بها الأجسامُ الساخنة الإشعاعَ وتمتصُّه، أن التجويفَ الذي تحيط به مادةٌ ساخنة يجب مَلْؤُه بإشعاع يتناسب مع درجةِ حرارة المادة المحيطة. ووضَعَ هذا الاكتشافُ نهايةً للفكرة القائلة بأن الجزءَ الداخلي من الشمس ربما يكون أجوفَ وبارداً بما يَكْفي للسماح بدعْمِ الحياة، وذلك نظراً لأن الجزءَ الداخلي من الشمس في الواقع مُحاطٌ بسطحٍ ساخن.



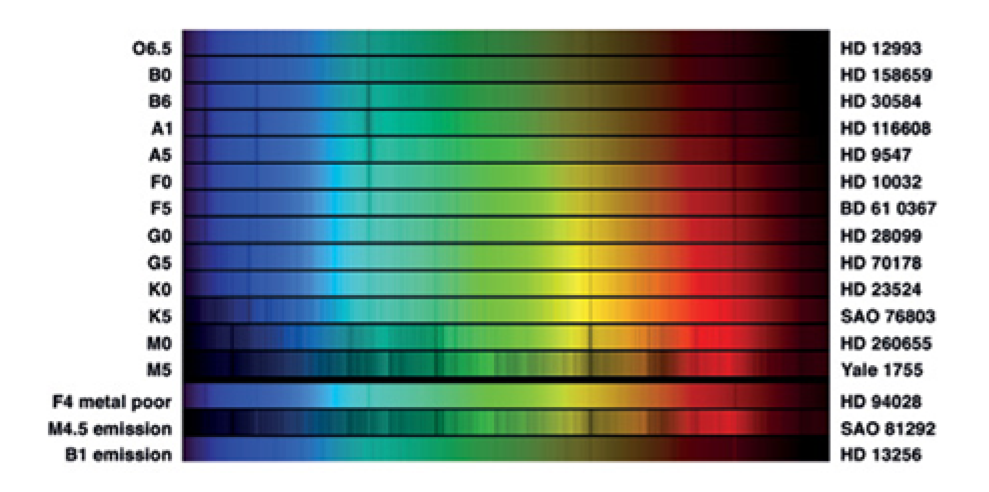
36- تمثيلٌ رقمي للطيف الشمسي الذي رصَدَه المرصدُ الوطني للطاقة الشمسية في كيت بيك، ولاية أريزونا، ويَظهر بوضوحٍ في هذه الصورة المكبَّرة للغاية العديدُ من خطوط فراونهوفر.

تفسير الطيف الشمسي

إطـلاقُ لفظِ «مِطْياف» علـى أداةٍ ما يَعْنـي أنك تَنظرُ بعينك عبر الأداة، ومن الشائع استخدام «مرسام الطيف» للتسجيل الفوتوغرافي، و«مقيـاس الطيف» للمَسْح الإلكترونـي. وبالطبـع، فـإن إمكانياتِ المِطْياف الذي نستخدمه اليومَ أكبرُ كثيراً من إمكانياتِ المِطْياف الذي استخدَمَه فراونهوفر أو كيرشوف. وبفضلِ الأدوات الحديثة، لدينا الآن فهارسُ رصَدْنا فيها زُهاءَ مليونِ خطٍّ طيفي في طيف فراونهوفر للشمس. ويَعرضُ الشكل 36 الطيفَ الشمسي للضوء المرئي، وهذه الصورةُ عبارة عن تمثيلٍ لعمليةٍ رقميةٍ سمحتْ برؤيةِ الشمس بدقةٍ طيفية عالية جداً.

يَظهر كلُّ خطٍّ من تلك الخطوط الطيفية نتيجةَ انتقالِ إلكترونٍ من مستوى طاقةٍ إلى آخَرَ داخلَ ذرةٍ موجودة في الغِلاف الجوي للشمس. يَنتج الخطُّ البارز القوي المسمَّى Hα، على سبيل المثال، عندمـا يَنتقل إلكترونٌ من المستـوى 2 إلـى المستوى 3 فـي ذرة الهيدروجين. توصَّلتْ عالمةُ الفيزيـاء الفلكيـة البريطانية الأمريكيـة سيسيليا باين Cecilia Payne (التي تغيّر لقَبَها لاحقاً ليصبح باين- غابوشكين Payne- Gaposchkin)، عن طريقِ التحليل الطيفـي فـي عـام 1925، إلـى أن 90 فـي المئـة أو نحوَ ذلك مـن الشمس تتكوَّن من الهيدروجين. يحتـوي الهيدروجين علـى إلكترونٍ واحد فقط يُنتِج خطوطَ انبعاثٍ عن طريق الانتقال بين مستويَيْن مـن الطاقة؛ ولذا فإن طيفَه بسيطٌ للغاية، وبه عددٌ قليل مـن الخطـوط الطيفية. الحديدُ هو أحدُ العناصر العديدة الأخرى الموجودة بكَمِّياتٍ ضئيلة في الغِلاف الجوي للشمس، ويحتوي الحديد في حالته المتعادلة على 26 إلكتروناً تنتقل بين عددٍ أكبرَ بكثيرٍ من أزواجِ مستوياتِ الطاقة الممكنة؛ الأمر الذي يؤدِّي إلى ظهورِ عدةِ مئات من الخطوط الطيفية في الطيفِ الشمسي. لقد أعدَّتْ شارلوت مور Charlotte Moore وآخَرون منذ ذلك الحينِ فهـارسَ رصَدَتْ آلافَ الانتقالات بين مستويات الطاقة داخـل عشرات العناصـر من أجل تفسيرِ خطوطِ فراونهوفر الشمسية.

في الفترة بين أواخرِ القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين، قـام فريـقٌ مـن الحُسَّاب (أي الأشـخاص الذيـن يَحْسبون الأشياء) في مَرصدِ كلية هارفارد بفحْصِ أطيافِ آلاف النجوم وتصنيفها. صنَّفتْ آني جَمب كانون Annie Jump Cannon وَحْدها أكثرَ مـن مئة ألف نَجْمٍ من حيـث قوةُ خطوطِ الهيدروجين التي يُمكِن رصْدُها في الأطياف، وخَلصَتْ كانون إلـى أن النوعَ الطيفي A هو الأقوى. وتوصَّلتْ كانون أيضاً، في أوائل القرن العشرين، إلى أن السببَ في ضَعفِ خطوطِ الهيدروجين قد يَرجِعُ إلى أن النَّجْمَ كان أكثرَ سخونةً مـن النجـوم من النـوع الطيفي A، أو أكثرَ برودةً منها. ولذلك، أُعِيد ترتيبُ التسلسُل الأبجدي للأنواع الطيفية كما وضعَتْه كانون ليأخذَ فـي اعتباره عاملَ الحرارة، مما أسفَرَ عن ظهورِ قائمةِ الأنواع الطيفية المألوفة لدينا اليومَ وترتيبها:
O B A F G K M. وبفضلِ التقدُّم في تقنيةِ الأشعة تحت الحمراء، يُمكِننا الآن إضافةُ أنواعٍ طيفية للنجومِ الأكثرِ برودةً (باستخدامِ أحرُفٍ لم تُستخدَم مسبقاً) وهي: L T Y.



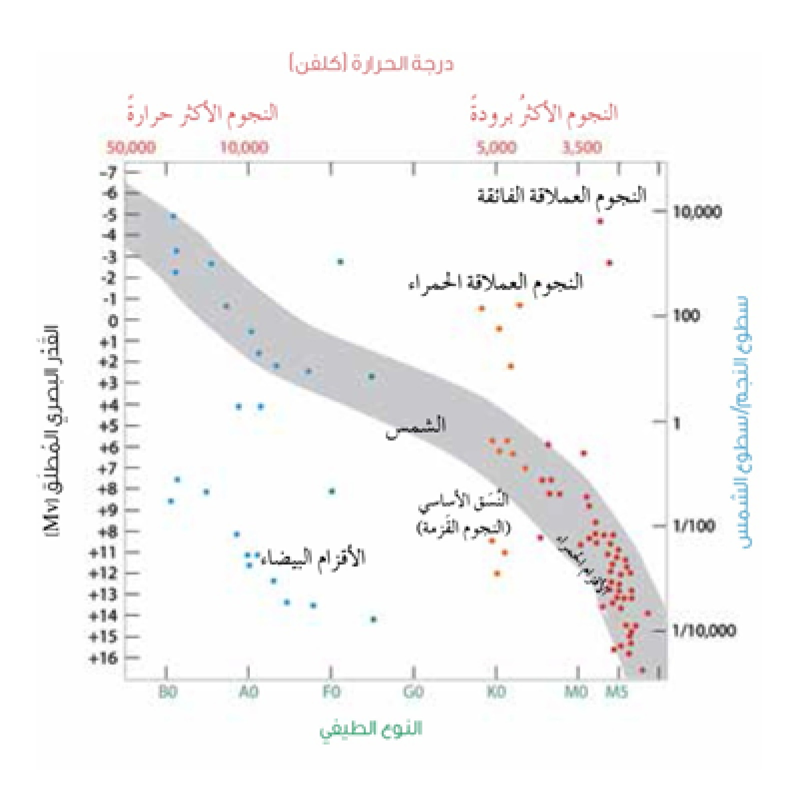
37- صورةٌ تَعرض أطيافَ مجموعةٍ كبيرة من النجوم تتفاوت فيما بينها من حيث درجةِ حرارةِ سطْحِها،
وتَظهر النجومُ مرتَّبةً من الأعلى حرارةً في أعلى الصورة، إلى الأبردِ في أسفلها.

يَعرضُ الشكل 37 مجموعةً من الأطياف التي تُقارِن نجوماً تتفاوت فيما بينها من حيث درجة حرارةِ سطْحِها. عندما ترتفعُ حرارةُ العناصر الموجودة في الغِلاف الجوي لهذه النجوم، فإن ذلك يؤدِّي إلى فقْدِ الإلكترونات الخارجية التي تكون طاقةُ ارتباطِها ضعيفةً في أيِّ ذرة؛ الأمر الذي يؤدي بدوره إلى انخفاضِ عددِ الإلكترونات المتاحة لتكوينِ خطوطٍ طيفية. تحتفظُ ذراتُ وجزيئاتُ النجوم ذات الأنواع الطيفية الأكثر برودةً بالكثير من إلكتروناتها؛ ومن ثَم يَظهر بها المزيدُ من الخطوط الطيفية. إن شمسنا نَجْمٌ من النوع G2؛ أيْ أنها تقع عند خُمسِ المسافة بين النوعَيْن الطيفيَّيْن G وK.

الأنواعُ الطيفية موضَّحةٌ على يسار الصورة، وأسماءُ النجوم كما تظهر بالفهرس موضَّحةٌ على اليمين. لاحِظْ أن النجومَ الأكثرَ برودةً على هذه القائمة، وهي النجوم من النوع الطيفي M، لديها عددٌ أكبرُ من الخطوط الطيفية (العديدُ من تلك الخطوط نشأ عن الجزيئات التي لا تتحمَّل درجاتِ حرارةٍ أعلى) مُقارَنةً بتلك النجومِ ذاتِ الأسطح الأكثرِ سخونةً. وبالنظر إلى الأنواع الطيفية بين B0 وG0، فإن سلسلةَ الهيدروجين التي يَظهر بها خطٌّ أحمرُ وخطٌّ أخضرُ وخطٌّ أزرقُ تَسهلُ رؤيتُها على نحوٍ خاص، وتبدو في أقوى صُورِها في النوع الطيفي A.

قبلَ مئة عام، فحَصَ هنري نوريس راسل Henry Norris Russell، عالِمُ الفلك بجامعة برنستون، بعضَ العناقيد النجمية في السماء، ولاحَظَ وجودَ ارتباطٍ بين درجةِ حرارة النجوم ودرجةِ سطوعها الحقيقي. وبعد أنْ أَعَدَّ راسل مخطَّطاً بيانياً حدَّد عليه مواقعَ النجوم بحسب العلاقةِ بين درجةِ حرارةِ كل نَجمٍ ودرجةِ سطوعه، وجَدَ أن معظمَ النجوم تَتَّبع خطاً مائلاً على الرسم البياني أطلَقَ عليه اسمَ النَّسَق الأساسي. وجَدَ راسل أيضاً بعضَ النجوم التي تتميَّز بشدةِ سطوعها مُقارَنةً بنجومِ النَّسَق الأساسي من اللون نفسه. ونظراً إلى أن النجوم المتحدة اللون لها درجة الحرارة نفسها، ومن ثَمَّ درجة السطوع نفسها لكل وَحْدةٍ من مساحة السطح، فقَدْ خَلص راسل إلى

أن تلك النجومَ هي على الأرجح أكبرُ حجماً من نظيرتها من نجومِ النَّسَق الأساسي. وبما أن هذه النجومَ الموجودة في أعلى يمينِ المخطَّط، الذي لطالما عُرِف بمخطَّط راسل، هي على الأرجح نجومٌ ضَخْمة، فقد أطلَقَ عليها راسل اسمَ العمالقة. وبالمقارَنة، تُعرَف النجومُ العادية من نجومِ النَّسَق الأساسي بالأقزام. وتُعَد الشمس واحدةً من تلك النجوم القَزِمة، وتنتمي إلى النوع الطيفي G2.



38- المخطَّط المعروف باسم مخطَّط هرتزشبرونغ- راسل Hertzsprung- Russell يوضِّح العلاقةَ بين السطوع المطلَق للنجوم ودرجةِ حرارتها. تقع معظمُ النجوم على امتدادِ خطٍّ مائل يُسمَّى النَّسَق الأساسي، وكلَّما اتجهنا أسفلَ النَّسَق

أصبحتِ النجومُ أكثرَ خفوتاً وبرودةً. تستهلك النجومُ الأشدُّ سطوعاً وسخونةً وقودَها بسرعةٍ كبيرة وتتطوَّر وتَخرجُ من النَّسَق الأساسي قبل النجوم الباردة الأصغر حجماً والأطول عُمراً.

أعدَّ عالِمُ الفلك الدنماركي إينار هرتزشبرونغ Ejnar Hertzsprung في وقتٍ سابق بعضَ الرسومِ البيانية المماثِلة، لكنها كانت تخصُّ عنقودَ نجومِ الثُّريا، وهي تجمُّعاتٌ نَجْميةٌ حديثةُ السن ولا تحتوي إلا على نجومٍ من تلك التي تنتمي إلى النَّسَق الأساسي فقط، ولم يسمح لها الوقتُ بالتطوُّر إلى عمالقة. ولذلك السبب، أغفلَ هرتزشبرونغ النقاطَ الرئيسة التي ظهرتْ في مخطَّط راسل، ونُشِر عمَلُه في مجلةٍ ألمانية مغمورةٍ مَعْنيَّة بالتصوير. ولكن في أربعينيات القرن الماضي، أقنَعَ بعضُ علماء الفلك غير الأمريكيين سابرامانين تشاندراسخار Subrahmanyan Chandrasekhar، الذي كان وقتَها محرِّرَ دوريةِ «الفيزياء الفلكية»، بإضافةِ اسم هرتزشبرونغ إلى مخطَّطِ راسل، فأضافه بعد أن استسلم أخيراً أمامَ إصرارهم. يُعرَف المخطَّطُ

الآن باسمِ مخطّط هرتزشبرونغ- راسل (الشكل 38)، وهو أداةٌ مهمة يستخدمها علماءُ الفلك لرسْمِ النجوم والعناقيد النَّجْمية، ودراسةِ تطوُّرها على مدى مليارات السنين.



39- عند رصْدِ كسوفِ الشمس من الغابون في عام 2013، بالتزامُن مع بدايةِ دخولِه المرحلةَ الكلية، ظهرتْ حافةٌ حمراءُ حول الشمس، وهي الغِلافُ اللوني للشمس. يَظهر في الصورة أيضاً شُوَاظٌ أحمرُ مُندفِع، وهو لمادةٍ ذاتِ درجةِ حرارةٍ مماثِلة لدرجةِ حرارةِ الغِلاف اللوني، بالإضافة إلى انبعاثَيْن بلون أبيض من الانبعاثات الكتلية الإكليلية (منتصف اليمين وفي أقصى منتصف اليسار).

الفصل الخامس
الغِلاف اللوني والشُّوَاظ الشمسي

نَشهَد يومياً سطوعَ الشمس فوق رؤوسنا (في غياب السُّحُب بالطبع)، ولكنْ ما نراه ونظنُّه حافةً دقيقةً لقُرص الشمس الدائري الساطع ليس في الواقع الحافةَ الشمسية. فكما رأينا، يتجاوز الغِلافُ الجوي للشمس حدودَ «شمس النهـار» التي نراها، وهـي التسميةُ الدارجة للغِلاف الضوئي للشمس. وفوق السطح الظاهري للشمس مباشَرةً توجد منطقةٌ تبدأ عندها درجةُ الحرارة في الارتفاع بدلاً من الانخفاض كما هو متوقَّع. وقد عَدَّها المنظِّرون فيما سبق طبقةً مُستوية تحيط بالغِلاف الضوئي، لكنها في الحقيقة منطقةٌ معقَّدة، تتألَّف من نتوءات حادة دقيقةِ الحجم من المادة، ذلك إذا جازَ لنا أن نصِفَ مَعالِمَ تمتدُّ لآلافِ الكيلومترات، أيْ أكبر من المملكة المتحدة، بأنها «دقيقة الحجم». وهي تُوصَف بذلك مُقارَنةً بحجمِ الشمس ذاتها. ويُسمى الجـزء الناتـئ من الغِلاف الجوي للشمس الغِلافَ اللوني (الكروموسفير). وفيه ترتفعُ درجةُ الحرارة من 6 آلاف درجة مئوية تقريباً، وهي درجةُ حرارةِ الغِلاف الضوئي، إلـى ما لا يقل عن 20 ألف درجة مئوية.

اكتشاف الغِلاف اللوني

أثبَتَ كيفن ريردون Kevin Reardon، عالِمُ الفيزياء الشمسية بالمرصـد الوطنـي للطاقـة الشمسية بالولايـات المتحـدة، وجـودَ تعليقاتٍ علـى وجـود الغِلاف اللونـي فـي بداية الكسوف الكلـي ونهايته، يعودُ تاريخُها لأكثرَ من ثلاثمئة عام. وقال جون فلامستيدJohn Flamsteed، الفلكيُّ الملكي، فـي عـام 1706، فـي حديثـه أمامَ الجمعية الملكية إن كابتن ستانيان Captain Stanyan ذكر أن «خروجَ الشمـس من الكسوف سبَقَه خطٌّ أحمرُ دمـوي من طرَفِها الأيسر لم يستمرَّ أكثرَ من ستِّ أو سبعِ ثوانٍ، ثم ظهر فجأةً جزءٌ من القُرص الشمسي». لكن القـول بأنهم رصدوا تلك الحُمْرة لا يعنـي بالضرورة أنهم فهموها، وتابَعَ ستانيان قائلاً: «لقد لاحَظتُ ذلك وذكَرتُه لك، لأنه يشير إلى وجود غِلافٍ جـوي للقمر». أدلـى راصدون آخَرون بتعليقاتٍ مُماثِلة

في أوائل القرن الثامن عشر، من بينهم إدموند هالي Edmond Halley، الذي أعدَّ تجهيزاتٍ خاصةً لرصد الكسوف الكلي للشمس الذي شهِدَتْه إنجلترا عام 1715.

وبعد مُضِي أكثرَ من قرنٍ من الزمان، لاحَظَ فلكيٌّ ملكي آخَر، وهو جورج بيدل آيري George Biddell Airy، وجودَ حُمرةٍ حول حافةِ الشمس وقتَ حدوثِ الكسوف. عندما تبرز تلك الحُمْرةُ بصورةٍ ملحوظة، فإنها تُعرَف باسم «الشُّوَاظ الشمسي» (الشكل 40). (عندما يشير شخصٌ عَرَضاً إلى شيءٍ كهذا بوصْفِه «توهجاً شمسياً» عند حافةِ الشمس، فإنه يكون مُخطِئاً؛ فالتوهُّجات الشمسية مختلفة تماماً). وفي عام 1842، كتب آيري في «مذكرات الجمعية الفلكية الملكية» ما يلي:

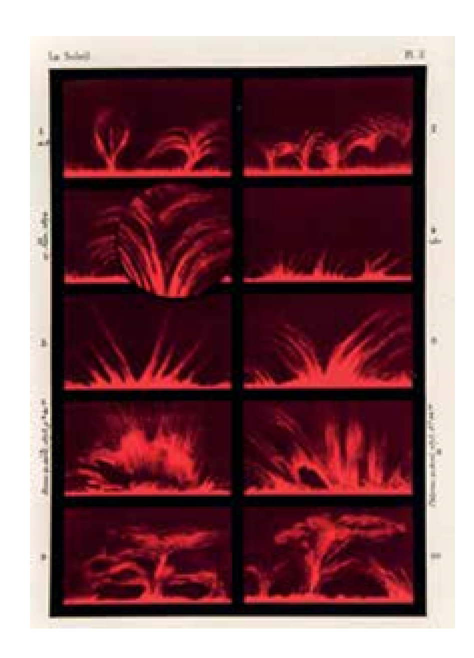
بينما كنت أنظرُ إلى القمر، دُهِشتُ لرؤيتي لهباً ضئيلاً أحمرَ اللون، في الجزء السفلي الظاهر من القرص ... ذا لونٍ أحمرَ قانٍ، وكان أشدَّ سطوعاً مُقارَنةً بأي جزءٍ آخَر من الحلقة.

يبدو أن روايتَه تشير إلى مُشاهَدته أيضاً الغِلاف اللوني الضارب إلى الحُمرة. في وقتِ الكسوف يعادل سطوعُ الغِلاف اللوني زُهاءَ 1/1000 من سطوع الغِلاف الضوئي للشمس. وفي المقابل، يكون الإكليلُ الشمسي عامِلاً آخَر، ويكون أقلَّ سطوعاً من الغِلاف اللوني بنحو 1000 مرة.

علَّقَ عالما الفيزياء الشمسية بيتر فوكال Peter Foukal وجاك إيدي Jack Eddy على التقارير التي تناوَلتِ الغِلافَ اللوني للشمس خلال الحدِّ الأدنى المطوَّل لنشاطِ البُقَع الشمسية (1645- 1715) إبَّانَ دورةِ البُقَع الشمسية - وهي الفترةُ الزمنية الممتدة التي يكون فيها عددُ البُقَع الشمسية منخفضاً للغاية - قائِلَيْن: إنها تشير إلى استمرارِ بعض النشاط المغناطيسي على الشمس حتى خلال تلك المرحلة، بالنظر إلى أن بِنْيةَ الغِلاف الضوئي ثابتةٌ في مكانها، وأنها ربما تكون ناتجةً عن المجالات المغناطيسية للشمس.

تفاصيل الغِلاف اللوني

خلالَ كسوفِ عام 1851، لم يقتصر تعليقُ آيري والفلكيِّ الإنجليزي فرانسيس بيلي Francis Baily على الشُّوَاظ الشمسي فقط، وإنما شملَ التعليق «خطاً من البروزات ... أشدَّ سطوعاً من بقيةِ الشُّوَاظ ... يميل لونُه إلى القرمزي». ووصَفا هذا الشكل الذي يبدو كأسنانِ المنشار باسم «سييرا» sierra (الشكل 41).

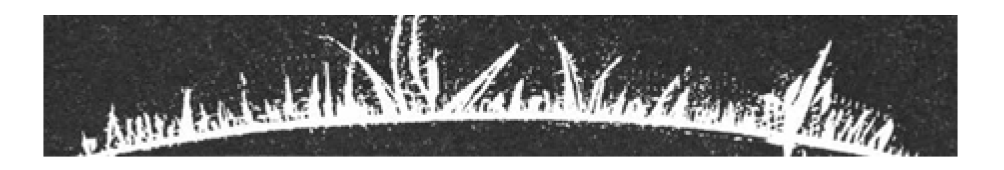


40- الغِلاف اللوني للشمس والشُّوَاظ الشمسي، من كتاب «الشمس» (Le Soleil) (ونسخته الألمانية

Die Sonne)، الصادر عام 1875 لمؤلِّفه الأب أنجيلو سيكي Angelo Secchi.

وبحلول كسوفِ عام 1860، ساعد التصويرُ الفوتوغرافي على التقاطَ صورٍ تَعرض الغِلافَ الضوئي (ولكن بالأبيض والأسود فقط؛ إذ كان ذلك قبلَ عقودٍ من ظهور التصوير الفوتوغرافي الملون). وأظهرتِ المقارَنةُ بين الصور التي الْتَقَطها الإنجليزيُّ وارن دي لا رو Warren De La Rue، وتلك التي الْتَقَطها الأب اليسوعي الإيطالي أنجيلو سيكي، تحرُّكَ الشُّوَاظ مع الشمس وليس القمر، وبهذا يكون ذا صلةٍ بالشمس ولا صلةَ له بالغِلاف الجوي للقمر. (نعلم الآن أنه لا يوجد أيُّ غِلافٍ جوي للقمر).

وفي كسوفِ عام 1860 في إسبانيا، علَّقَ سيكي أيضاً قائلاً: «تغطِّي هذه المادة سطحَ الشمس بأكمله، وكأنها غِلافٌ شفَّاف يحيط بها بالكامل. ومن ثَم لا شكَّ في أن الشمسَ مُحاطةٌ عند حدودِ غِلافها الضوئي بغِلافٍ ضوئي خافِتٍ من غازٍ شفَّاف وردي اللون، لكنه لا يكون مرئياً في جميعِ مُحاوَلات الرصد العادية».



41- الغِلاف اللوني للشمس يَظهر على هيئةِ «بستانٍ مُحترِق»، رسْمٌ إيضاحي يعود تاريخُه إلى عام 1872، ورد في كتاب «الشمس» (The Sun) للفلكيِّ الأمريكي تشارلز أوغست يونغ

.(Charles Augustus Young (1881

التحليل الطيفي واكتشاف الهيليوم

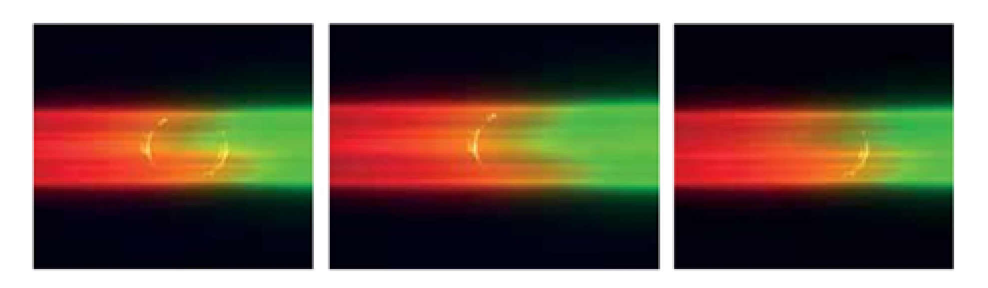
يُعَد كسـوفُ عامِ 1868، الذي شهِدَتْه منطقةُ جنوبِ آسيا، نقطةَ تحوُّلٍ فـي تاريخِ معرفتنا بالغِلاف اللونـي للشمس. فقد انطلقتْ عدةُ بعثاتٍ استكشافية من إنجلترا وفرنسا إلـى الهند لرصْدِ هذا الحَدَث، أشهرُها تلك التي شارَكَ فيها الفلكيُّ الفرنسي جول يانسنJules Janssen. اصطحبَ يانسن معه المِطْياف المُخترَع حديثاً للمرة الأولى إلـى موقع الكسوف. وأثناء حدوث الكسوف، عندما اختفى طيفُ فراونهوفر (طيفُ الامتصاص) الناتجُ عن الغِلاف الضوئي للشمـس إبَّانَ تغطيةِ القمرِ للغِلافَ الضوئـي للشمـس بالكامـل، ظهرتْ سلسلةٌ من الخطوط الملوَّنة عبر الطيف. وتُسمَّى هذه الخطوطُ خطوطَ الانبعاث لأنها تَظهر مقابلَ طيفٍ أسودَ (أو على الأقل داكن نسبياً) وتعبِّر عن الإشعاعِ المنبعث عند تلك الألوان (الأطوال الموجية) المحدَّدة. ومن بين أبرزِ خطوطِ الانبعاث، هناك زوجٌ من الخطوط الصفراء الزاهية (أو البرتقالية، وفقاً لبعض الأقوال) يتوافق مع خطوطِ امتصاصِ فراونهوفر التي تحملُ الرمزَ D، وكان يُعتقد أن هذه الخطوطَ صادرةٌ عن عنصر الصوديوم (وسُمِّيت «خطوط الصوديوم D») وهذا يُفسِّر توهُّجَ اللهبِ باللون الأصفر عندَ إلقاءِ ملحِ الطعام (كلوريد الصوديوم، NaCl) فيه. أدرك يانسن أن الخطَّ الأصفر الذي رآه في طيفِ الغِلاف اللوني لم يكُن واقعاً بالضبط في نطاقِ الطول الموجي (لون) لخطوط الصوديوم D، وإنما كان مُزاحاً قليـلاً. وبالمثـل، أدرك يانسـن أن خطـوطَ الانبعاث تبـدو شـديدةَ السطوع، بحيث ربما كان من الممكن رؤيتها دون الحاجة إلى وجود كسوف، وفي اليوم التالي تمكَّنَ من القيام بذلك.

لكن التاريخ أكثرُ تعقيداً من الرواية الشائعة لهذا الحَدَث؛ فلم يكُن يانسن الوحيدَ الذي شاهَدَ الخطَّ الأصفر الساطع وقتَ حدوثِ الكسوف. فقد استخدَمَ علمـاءُ الفلك الإنجليز نورمان بوغسون Norman Pogson، وجيمس تينانت James Tennant، وجون هيرشل John Herschel، أيضاً أجهزةَ التحليلِ الطيفي في الهند، وشاهَدوا هذا الانبعاثَ الطيفي. ويحاول كتابُ «قصة الهيليوم ومولد الفيزياء الفلكية» (*The Story of Helium and the Birth of Astrophysics*) الصادرُ عـامَ 2013 لمؤلفـه بيمان ناث Biman Nath، وضْعَ أحداثِ القصة في نِصابِها الصحيح.

كان الفلكيُّ الإنجليزي نورمان لوكير Norman Lockyer، أثناء حدوثِ الكسوف، يتعافى من مرضٍ أصابه، ولـم يذهب إلى الهند ليشاهد هذا الحَدَث. لكنه طلب إحضارَ مِطْيافٍ أقوى من المِطْياف المُصطحَب لرصد الكسوف. لكن لوكير لـم يحصل على المِطْياف الذي طلبه إلا بعد شهور، ومع ذلك فقد تمكَّنَ آنذاك من رؤيةِ طيف الغِلاف اللونـي والشُّوَاظ الشمسي من موقعه في إنجلترا دون الحاجة إلى وجود كسوف.

عمل لوكير في المختبر برفقةِ الكيميائي البارز إدوارد فرانكلاند Edward Frankland، لكن الخطَّ الأصفرَ لم يَبْدُ مُطابِقاً لأيِّ خطٍّ طيفي معروف. ولهذا السبب قالا: إن الخطَّ الطيفي منبعثٌ من

«الهيليوم» نظراً لوجوده في الشمس فقط (واستخدما لتسميته اسمَ هيليوس؛ إلهِ الشمس عند اليونان). وبما أن الخطَّ الطيفي للصوديوم الأرضي ذا الرمز D، يُمكِن تسميتُه D1 وD2، سُمِّي هذا الخطُّ الجديد باسم D3 (الشكل 42).



42- صورةٌ حديثة يَظهر فيها طيفُ الكسوف للغِلاف الضوئي للشمس، ويُسمَّى «الطيفَ الومضي». وتظهر في الصورة خطوطُ الغِلاف الضوئي وهي تُومِض على هيئةِ خطوطِ انبعاثٍ عندما تختفي خطوطُ فراونهوفر من الغِلاف الضوئي، نظراً لحجبه. الخط الأصفر D3 للهيليوم أوضحُ من الخطَّيْنِ D1 وD2 المتلازمَيْن الناتجَيْن عن وجود الصوديوم في الغِلاف اللوني، على الرغم من أن الخطَّيْن D1 وD2 يَظهران في طيفِ فراونهوفر ولا يَظهر فيه الخطُّ D3.



43- عملاتٌ تذكارية صادرةٌ عن دارِ سكِّ العُملة في باريس تخليداً لاكتشافاتِ يانسن ولوكير. يَظهر على أحدِ وجهَيِ العُملة يانسن ولوكير، ويَظهر على الوجه الآخَر الشُّوَاظ الشمسي الصادر عن كسوف الشمس.

لم يكن لوكير شخصاً لطيفَ المعشر، وهو ما دفَعَ الفلكي الإسكتلندي البارز جيمس كلارك ماكسويل James Clerk Maxwell (الذي يُعَد أحدَ أعظمِ علماءِ الفيزياء عبر العصور، إلى جانب نيوتن وأينشتاين) إلى أن يكتب:

إنه لوكير مراراً وتكراراً،

إنه يزداد تباهياً وغروراً،

إذ يظن أنه يمتلك الإكليلَ الشمسي.

على الرغم من أن مُشاهَدات لوكير، في 19 أكتوبر 1868، أُجريت بعد شهرَيْن ويومٍ من اغتنام يانسن سطوعَ خطوطِ الانبعاث ورؤيتها في اليوم التالي للكسوف، فإن الأوراقَ البحثية التي قدَّماها إلى أكاديمية العلوم في باريس وصلتْ مُصادَفةً في اليوم ذاته. لذا يُقال عـادةً إن اكتشافات يانسن ولوكير كانـت مُتزامِنةً (مـع إغفالِ ذِكْرِ راصِـدي الكسـوف الآخَرين الذين رصَدوا الخطَّ الأصفر). كتـب لوكير (في ورقةٍ بحثية عام 1868 نُشِرت في «وقائع الجمعية الفلكية في لندن»):

تضمَّنتْ عملياتُ الرصد اكتشافاً وتحديداً دقيقاً لخطوطِ طيفِ الشُّوَاظ بتاريـخ 20 أكتوبر، وحقيقـةَ أن الشُّوَاظَ الشمسي مجردُ تجمُّعٍ مَوْضعي لوسطٍ غازي يغلِّف الشمسَ بأكملهـا. واقتُرِح أن يُسـمَّى هـذا الغِلاف بـ «الغِلاف اللونـي» لتمييزه عن الغِلاف الجوي البارد الذي يمتصُّ الأشعةَ من ناحيةٍ [من المفترض أن يكونَ مصدرَ خطوط فراونهوفر، الـذي يُعرَف الآن بأنه الجزءُ العلـوي من الغِلاف الضوئي]، ولتمييزه عن الضوء الأبيض للغِلاف الضوئي من ناحيةٍ أخرى.

فـي عـام 1895، تمكَّنَ الكيميائـــي الإنجليـزي وليـام رامـزيWilliam Ramsay من عزْلِ غاز الهيليوم الأرضي، ونعلم الآن أنه ثاني أبسطِ العناصر؛ إذ يوجد فـي ذرَّتِه في حالتها المتعادِلة بروتونان ونيوترونان يحيـط بهما إلكترونان. وينتُج خط الهيليوم، الذي يُرمَز له بالرمز D3، بسبب انتقالٍ يحدث فـي الحالة المتعادلة، وتتطلَّب مستوياتُ طاقةِ الهيليوم درجةَ حرارة أعلى من تلك الموجودة فـي الغِلاف الضوئي لرفْعِ الإلكترونات إلى مستوى الطاقة الذي يؤدي إلى انبعاثِ الخط D3.

رَصْد الغِلاف اللوني والشُّوَاظ الشمسي

يبدو الغِلافُ اللونــي للشمس رقيقاً للغاية فـي حالـة الإشـعاع المستمر بحيـث يُمكِننا النظرُ مـن خلالـه لرؤيةِ الغِـلاف الضوئـــي للشمس. أو، إن شئنا التعبير عن الأمر بطريقة عكسية، يُمكِننا القولُ إن ضوءَ الغِلاف الجوي للشمس يَنفذ عبر الغِلاف اللونـي بأقل قدرٍ من التشتُّت وهو في طريقه إلينا وصولاً إلى الأرض. لكن إذا نظَرْنا إلى الغِلاف اللونـي باستخدامِ مرشحٍ فِي نطاق

الطول الموجي لأحدِ أقوى خطوطِ الغِلاف اللوني، فإن درجة الامتصاص تزيد وتتوَقّف قُدرتُنا على الرؤية عند مستوى الغِلاف اللوني. وتُعزَى حُمرةُ الغِلاف الضوئي إلى قوةِ انبعاث الهيدروجين في نطاقِ طولٍ موجي أحمرِ اللون، يُعرَف باسم «إتش- ألفا»، Hα؛ لأنه الأولُ من سلسلةٍ محدَّدةٍ من خطوطِ الانبعاث الصادرة عن انتقالاتٍ ذرية لإلكترون الهيدروجين الوحيد. ولذلك، إذا التُقِطتْ صورةٌ للغِلاف اللوني عند الطول الموجي الواقع في نطاقِ اللون الأحمر لإتش- ألفا، فإن ما تراه هو الغِلافُ اللوني.



44- طباعةٌ حجرية تَعرضُ رسماً للفنان إيتيان ليوبولد تروفيلوت Étienne- Léopold Trouvelot للشُّوَاظ الشمسي، وتَظهَر فيها خطوط إتش- ألفا، عام 1881.

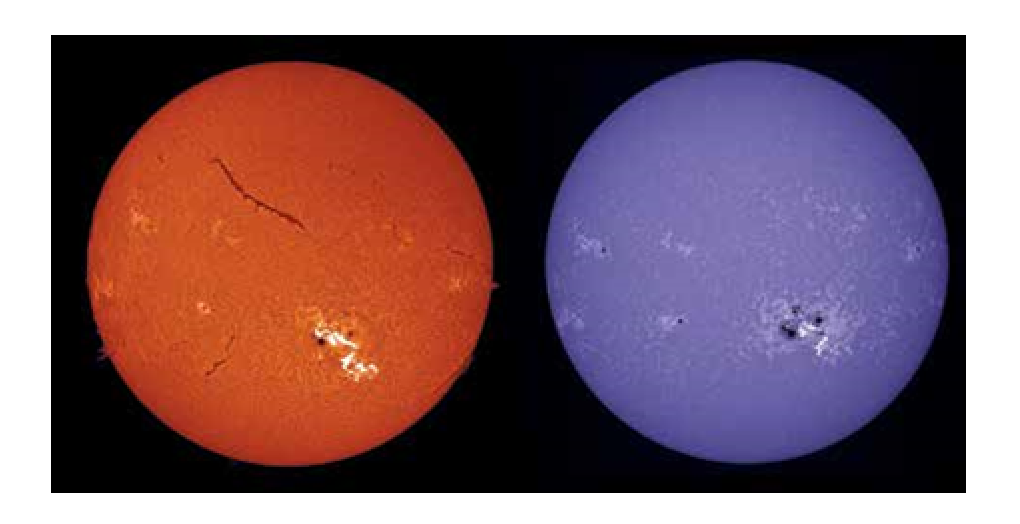
وبالمثل، يُمكنك فـي حالةِ التقاط صورةٍ عند أحد الأطوال الموجية فوق البنفسجية للكالسيوم المتأيّن أن ترى خطَّ فراونهوفر ذا الرمز K، وهو خطٌّ طيفي يقع في نطاقِ اللون البنفسجي، ينبعثُ من ذرات الكالسيوم ويتشكَّل عند درجةِ حرارةٍ أعلى ويقابله ارتفاعٌ أكبر في الغِلاف اللونـي. (استخدَمَ فراونهوفر الرمزَ H لخطِّ الكالسيوم ولكنْ له طولٌ موجي أطولُ قليلاً، ومن ثَم تَسهُل رؤيتُه إلـى حـد مـا، لكنه ممـزوجٌ بخط هيدروجين غيرِ مرتبط قريبٍ من طوله الموجـي المركزي).

استخدَمَ كلٌّ من جيانا كوزي Gianna Cauzzi من مرصدِ أرسيتري للفيزياء الفلكية Arcetri Astrophysical Observatory في فلورنسا بإيطاليا (وتَعمل حالياً في المرصد الوطني للطاقة الشمسية في بولدر) وكيفن ريردون، بالتعاون مع زملاء هولنديين ونرويجيين، مِطْيافَ التصوير في تلسكوب دُن سولار Dunn Solar Telescope في مرصد ساكرامنتو بيك Sacramento Peak Observatory فـي نيومكسيكو، لمُقارَنةِ المُشاهَدات المكانية والزمانية العالية للهيدروجين والكالسيوم بهدفِ تقييمِ آلياتِ زيادةِ حرارة الغِلاف اللونـي.

الغِلاف اللوني في القرن العشرين

شهِدَ منتصفُ القرن العشرين تطوُّراتٍ رصديةً هائلة في مجال الفيزياء الشمسية، من بينها الرؤيةُ الرائعة (ويقصد بها أساساً ثَبات الغِلاف الجوي) فـي مثل هذه المواقـع (علـى الرغم مـن أن ذلك كان لفتراتٍ محـدودة فقط مـن اليـوم)، مثـل مرصـد ساكرامنتو بيك فـي نيومكسيكو. فقد شيَّدَ ريتشارد دُن Richard Dunn هناك أدواتٍ يُمكِنها رصْدُ الغِلاف اللونــي بدقةٍ غير مسبـوقة، وكذلك فعَلَ راوي بهافيلاي Rawi Bhavilai من تايلانـد وجـاك بيكرز Jacques Beckers من هولندا خلال عملِهما فـي أستراليا استناداً إلى عمل والتر روبرتس Walter Roberts فـي «مرصـد المنسوب المرتفع» High Altitude Observatory في كليماكس، كولورادو.

لـم يقتصـر الأمـرُ علـى المشاهدة فقط، وإنما استطاع هـؤلاء الراصدون إجراءَ تسجيلاتٍ فوتوغرافيةٍ تفيد بأن الغِلاف اللوني ليس طبقةً مُتجانِسة مـن الغِلاف الجـوي للشمس (حتى وإنْ عَدَّها المنظِّرون كذلك في أغلب الأحوال)، وإنما ينقسم إلى شظايا صغيرةٍ سمَّاها روبرتـس «الشويكات». تَنشط هـذه الشويكاتُ وتَخمدُ فـي غضونِ خمسَ عشرةَ دقيقة، ويوجد منها مئاتُ الآلاف على الشمس فـي جميع الأوقات. وفـي عام 1965، انضمَّ روبرت نويـس من مرصـد كلية هارفارد، وأحـد مؤلِّفـي هـذا الكتـاب (جاي ميرون باساتشوف، لأطروحته للدكتـوراه)، إلـى بيكرز فـي ساكرامنتو بيك لقياسِ خـواصِّ الشـويكات، مثـل ارتفاعهـا وعَرْضهـا، وهـي الخواصُّ التـي كانـت ضمنَ حدودِ دقــة الرصـد.

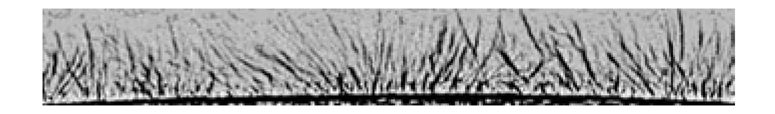


45- على اليسار: صورةٌ للشمس عبر مُرشحِ هيدروجين ألفا، تَظهر فيها بِنْيةُ الغِلاف اللوني للشمس. وبالإضافة إلى الغِلاف اللوني الذي يَظهر في الخلفية يُمكِن رؤيةُ خيوطٍ داكنة وبُقَعٍ شمسية وأشرطةٍ ساطعة في المنطقة النَّشِطة في أسفل اليمين؛ مما يشير إلى وجودِ توهُّجٍ شمسي نَشِط. وعلى اليمين: صورةٌ شبهُ مُتزامِنةٍ للشمس عبر مرشحِ الكالسيوم ذي الخط K، تَظهر فيها بِنْيةُ الغِلاف اللوني للشمس. يُمكِننا رؤيةُ مناطقَ ساطعةٍ تُعرَف باسم اللُّطَخ الضوئية، plages (تُنطق «بلاج»، وهي كلمةٌ فرنسية تَعْني الشاطئ) بالإضافة إلى وجودِ الغِلاف اللوني في الخلفية. وعند هذا الارتفاع في الغِلاف اللوني نرى الحُبَيْبات الشمسية الفائقة ظاهرةً في اللُّطَخ الضوئية المحيطة بالبُقَع الشمسية. يَظهر أيضاً سطوعُ شريطِ التوهُّج الشمسي على الرغم من أنه أقلُّ ظهوراً مُقارَنةً بظهوره عبر مُرشح إتش- ألفا.

ونظراً إلى أن الشويكات المرصودة عند الطرف الشمسي كانت عند حدودِ مجالِ «رؤية» الغِلاف الجوي، فقد شكَّلتْ غالباً حافةً خَشِنة مع الشويكات المجاورة. ومما زاد الأمر سوءاً أنها كانت تُرى ناتئةً على حافة الشمس، مع شويكاتٍ أمامية وخلفية لا تتمركزُ على الحافةِ بالضبط. لم تكُنْ دراسةُ الشويكات المنفردة أمراً مُمكِناً. وكان بالإمكان رؤيةُ أنَّ طولَها يزيد على عَرْضِها بنحو عشر مرات، عند أقصى ارتفاعٍ لها.

إن مقدارَ الكتلة الموجودة في الشويكات يَكْفي لتجديدِ الإكليلِ الشمسي في أقلَّ من ساعة؛ ولهذا فمن البديهي أنها تفقد جُلَّ الكتلة. ولكن يَصعُب للغاية مُتابَعةُ تطوُّرِ الشويكات بالرصد المباشِر. يُلاحَظ اختفاءُ جزءٍ كبير من الشويكات من الأعلى للأسفل، وهو أثرٌ مَرْئي قد ينتج عن اختفاءِ الشويكات؛ لأن الحرارةَ في الأعلى تتسبَّب في اختفاءِ الخطوط الطيفية قيد الدراسة، وهي خطوط إتش- ألفا عادةً. لذلك فإن عملياتِ الرصد التي أُجرِيت في ساكرامنتو بيك، وعملياتِ الرصد اللاحقة التي أجراها جاي ميرون باساتشوف وآخَرون، استخدمتْ طرائق طيفيةً لقياس سرعات الشويكات مباشَرةً عبر إزاحات دوبلر، بيْدَ أنه بوسعنا أن نرى فقط العناصر وهي تقترب باتجاهنا أو تبتعد عنا، في حين يَظهر بوضوحٍ أن العديد من الشويكات مائلٌ. تمكَّنَ أيضاً زاديغ مورادیان Zadig Mouradian في ميدون بفرنسا من رصْدِ الشويكات طيفياً، واستخدَمَ سيرج كاوتشمي

Serge Koutchmy في باريس خوارزمياتٍ حاسوبيةً لإنتاجِ صورٍ عاليةِ التبايُن والدقة للشويكات (الشكل 46).



46- شويكاتٌ بالقرب من القُطب الشمالي للشمس (الموقع الأصلي للشويكات التي وصَفَها والتر أُور روبرتس

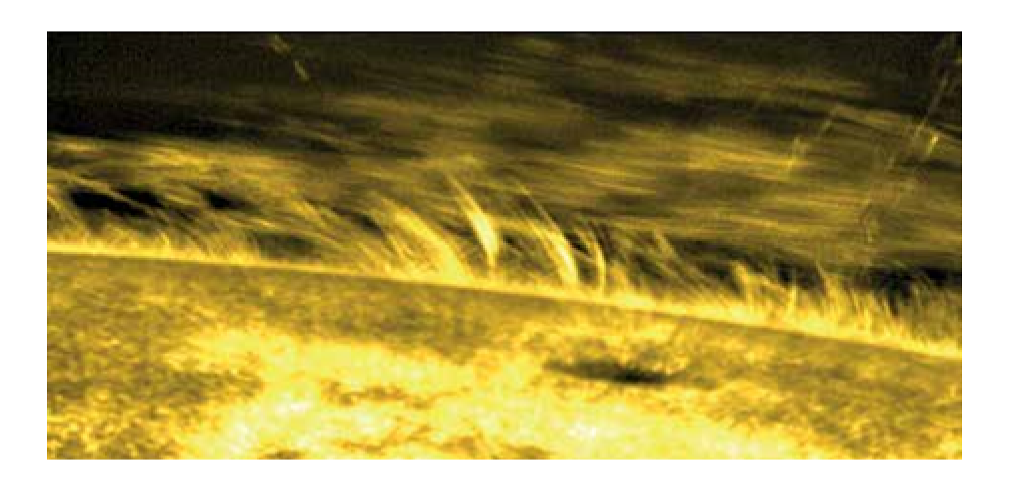
Walter Orr Roberts عام 1945)، رُصِدت باستخدامِ تلسكوبٍ بصري شمسي من مرصد هاينود Hinode على هيئةِ صورةٍ سلبية توضِّح الجوانبَ الخافتة، مع مُعالَجةٍ خاصةٍ عاليةِ التباين باستخدامِ أسلوبٍ يُدعى «ماد ماكس»، Madmax، ابتكره سيرج كوتشامي من معهد الفيزياء الفلكية بباريس. تبلغ الدقةُ نحو 70 كم أو عُشْر ثانية قوسية، أيْ أفضل بنحو عشر مرات من الدقة الأرضية المعتادة. ويصل عرْضُ الإطار بالكامل إلى 10 ثوانٍ قوسية، في حين يبلغ قُطْر قُرص الشمس نحو 1900 ثانية قوسية.

أصبح مُوجَزُ بيكرز لخواصِّ الشويكات، الصادرُ في مجلة «الفيزياء الشمسية»، Solar Physics، عامَ 1968، مَرجِعاً للدراسات المستقبلية للشـويكات. ولـم تُستأنَف دراسـةُ الشويكات وخواصِّـها حتـى تسعينيات القرن العشرين بالدراسة التـي أجراها ألفونس ستيرلنغ Alphonse Sterling من مركز غودارد لرحلات الفضاء، التابع لوكالة ناسـا. وأجـرى جـاي ميرون باساتشـوف وطلابُه إحصائياتٍ محدثـةً للشويكات بإجراءِ سلسلةٍ من عمليات الرصد برعاية وكالة ناسا، واستعانوا فـي مطلع القرن الحالي بالتلسكوب الشمسي السويدي البالغ قُطْره 1 متر في لا بالما بجُزرِ الكناري.

علـى مدارِ هـذه السـنوات العديدة، ركَّـزت ناسـا فـي تصميماتِ مَرْكباتها الفضائية على توسيعِ النطاقِ الطيفي قيد الدراسة، وشمل ذلك بالأخصِّ التصويرَ بالأشعةِ السينية والأشعةِ فوق البنفسجية، إلا أن ذلك تحقَّقَ على حسابِ الدقة المكانية. ولم يَحْظَ مقترحُ التلسكوب الضوئي الشمسي العالي الدقة المقدَّم إلى ناسا بالموافَقة. وفي العَقْد الأول من القرن الحادي والعشرين فقط، نجح «مُستكشِفُ المنطقة الانتقالية والإكليـل الشمسـي»، Transition Region and Coronal Explorer ويُعـرف اختصـاراً باسـم «تريـس»، TRACE، ولاحقـاً باسم مرصد ديناميكا الشمس، إلـى جانبِ التلسكوب الضوئي الشمسي (الشكل 47)، على متن مَرْكبة الفضاء اليابانية هاينود، في تحقيقِ مستوياتِ دقةٍ مكانية عالية في الفضاء وصلتْ إلى الحد الذي وصلنا إليه بالكاد على الأرض، ولكن بإنتاج صورٍ أكثرَ ثباتاً بالنظر لاستبعادِ تقلُّباتِ الغِلاف الجوي الأرضي. وسنناقش هذه المركبة الفضائية الشمسية المهمة في فصلٍ لاحق.

نظراً إلى وجودِ المركبات الفضائية فوق الغِلاف الجوي للأرض، فإنها تكون حسَّاسةً بشدةٍ للأشعةِ فوق البنفسجية القصوى، وبذلك تستطيع رصْدَ خطِّ انبعاثٍ أكثرَ ثباتاً للهيليوم، الناتج عن الانتقال الأول لإلكترونه المداري من الحالة الأرضية، والذي يظهر عند 304 أنغسترومات فقط، أيْ نحو واحد على عشرين من الطول الموجي لخط إتش- ألفا للهيدروجين. وتستطيع هذه المَرْكبات أيضاً رصْدَ خطِّ الهيدروجين المكافئ والأكثر ثباتاً من إتش- ألفا، ويُسمى خطَّ انبعاث ليمان- ألفا عند خُمس الطول الموجي لخط إتش- ألفا تقريباً. وعلى الرغم من أهميةِ هذه الخطوط فإن الإشعاعَ في كلٍّ من الأطوال الموجية للأشعة فوق البنفسجية، والأشعة فوق البنفسجية القصوى، لا يخترقُ الغِلافَ الجوي للأرض؛ لذلك نحتاج إلى وضْعِ مُعَداتنا في الفضاء إذا أردنا رصْدَ هذا الإشعاع.

كان تفاوُتُ جودةِ الصور أحدَ عوائقِ الرصد من الأرض؛ إذ تختلطُ أجزاءٌ ممتازة من الصورة من حينٍ لآخَر بشكلٍ عَرضي في أوقاتٍ غيرِ متوقَّعة. وفي ساكرامنتو بيك، اكتُشِف حلٌّ لتحسين الوضع، ويُقال إن هذا حدَثَ عندما لاحَظَ البعضُ تحسُّنَ الرؤية وقتَ ريِّ العشب. ولُوحِظ أن وجودَ مسطَّحٍ مائي يوفِّر تدفُّقاً صفيحياً أقلَّ اضطراباً للهواء، ويُزيل تياراتِ الهواء الساخن المتصاعِدة التي تسبِّب اضطراباتٍ في الصور التي يَعرضها التلسكوب.



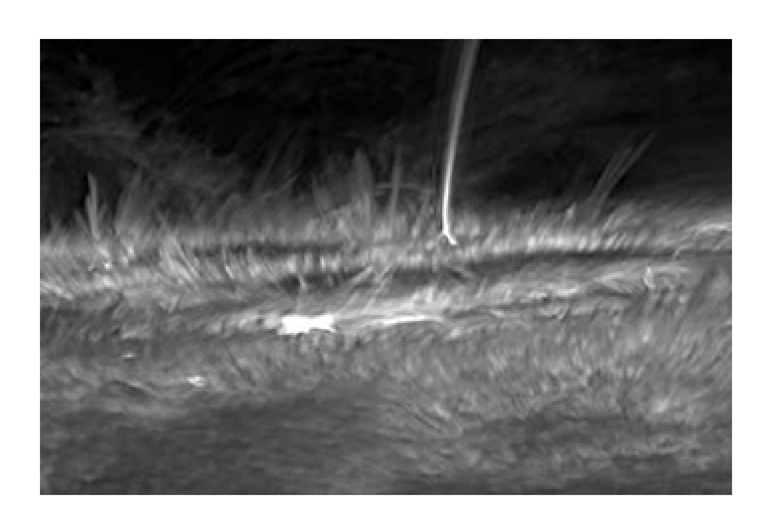
47- صورةٌ التقَطَها «التلسكوب البصري الشمسي» على متنِ مرصد هاينود عام 2013، تُظهِر شُوَاظاً شمسياً (من بعض الزوايا يَظهر الشُّوَاظُ على هيئةِ «خيوطٍ»، وهو المصطلح المستخدَم عندما يظهر أحدُها أمام قُرص الشمس) فوق غابةٍ من الشويكات، التُقِطت الصورة في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية.

وأدَّى ذلك إلى بناءِ تلسكوباتٍ شمسية بجانبِ مسطحاتٍ مائية أو داخلها. وشيَّد هارولد زيرين Harold Zirin، الباحثُ بمعهد كاليفورنيا للتقنية، «مرصد بيغ بير الشمسي»، Big Bear

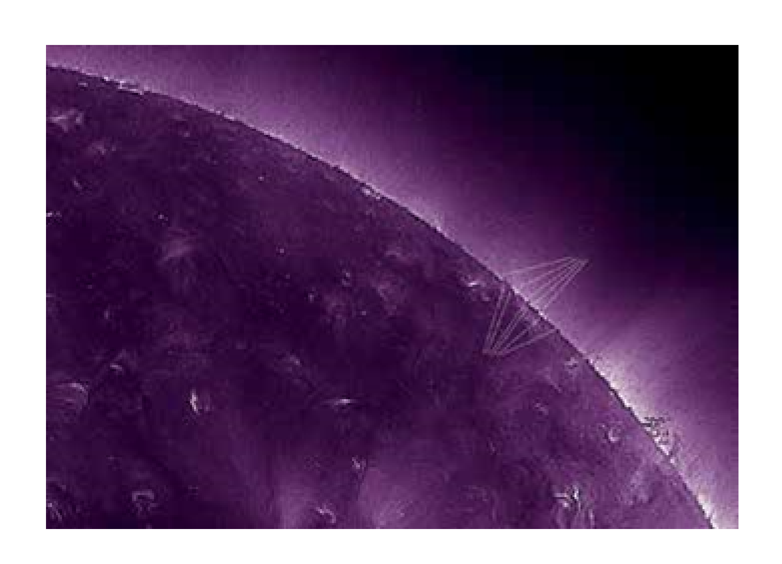
Solar Observatory، عند نهايةِ جسرٍ في بحيرةِ بيغ بير في كاليفورنيا لتوفيرِ صورٍ ثابتة على مدارِ جزءٍ كبيرٍ من اليوم؛ مما أتاح له ولطلابه وزملائه تصويرَ أفلامٍ خلال نشاطِ الغِلاف اللوني، شملَتِ النطاقَ إتش- ألفا. أظهرتْ هذه الأفلامُ في الغالب الحركاتِ اليوميةَ للشويكات وغيرها من الظواهر المعروفة باسم الشمسِ الهادئة، لكنها تضمَّنتْ أيضاً نشاطاً عنيفاً؛ ألا وهو التوهُّجات الشمسية. كانت صناعةُ الأفلام آنذاك تُجرى باستخدامِ الكاميرات ذاتها المستخدَمة في هوليوود، وتُسجَّل على شريطِ فيلمٍ لا بدَّ من مُعالَجته ودراسته وهو على بَكَراته. وشيَّدَ أرفيند بهاتناغار Arvind Bhatnagar، الذي شغل منصبَ كبير الراصِدين في بيغ بير لفترةٍ طويلة، مرصداً مماثِلاً على جزيرةٍ في بحيرة في أودايبور في الهند.

بعد تقاعُدِ زيرين، استحوذَ معهدُ نيوجيرسي للتقنية على مرصدِ بيغ بير الشمسي، وأصبح تحت سُلطةِ هايمين وانغ Haimin Wang الذي عمل سابقاً مع زيرين. ويضم المرصدُ الآن تلسكوباً شمسياً جديداً قُطْره 1.6 متر، جرى تثبيتُه عامَ 2010، ويضم نظامَ إعادةِ تصويرٍ متطوراً للتخلُّص من معظم حرارة الشمس، بالإضافة إلى بصرياتٍ تكيُّفية.

في عام 2007، صرَّحَ بارت دي بونتيو Bart De Pontieu من مختبرِ لوكهيد للطاقة الشمسية والفيزياء الفلكية، الذي يُدِير العديدَ من التلسكوبات الشمسية الفضائية، بأنه إضافة إلى الشويكة العادية من النوع الأول، Type I، التي يَبلغُ متوسطُ عُمرِها خمسَ عشرةَ دقيقة، وخضعت للدراسة منذ تسميةِ روبرتس لها عامَ 1945، يوجد نوعٌ آخَرُ من الشويكات يُسمى شويكات النوع الثاني، Type II، وهي تتلاشى سريعاً ومتوسطُ عُمرِها أقصرُ، يتراوح بين بضعِ ثوانٍ ونحو دقيقتَيْن.



48- شويكاتٌ عند حافة الشمس، الصورةُ مُلتقَطةٌ بالتلسكوب البصري الشمسي على متن هاينود.



49- صورةٌ عاليةُ المعالَجةِ مُلتقَطةٌ بواسطة «مجمع التصوير الجوّي» Atmospheric Imaging Assembly، التابع لمرصد ديناميكا الشمس Solar Dynamics Observatory، عند طول موجي 193 أنغستروماً، تتضمَّن بالأساس إشعاعاً ناتجاً عن الحديدِ المتأيّن 11 مرة (المنبعِث من غازٍ عند درجةِ حرارة 1.2 مليون كلفن) تُظهِرُ النقاطَ المضيئة التي تمثِّل قواعدَ أعمدةِ الغاز الإكليلي، في أماكنَ مختلفةٍ قليلاً عن أماكنِ النقاط المظلِمة في الغِلاف اللوني التي ربما تمثِّل شويكاتِ الغِلاف اللوني.

لقد دُرسَت هذه المَعالِم دراسةً أفضلَ من الفضاء باستخدامِ التلسكوب البصري الشمسي على متن هاينود نظراً لدقتِه المكانية، وهو ما مكَّنَ دي بونتيو ومُعاونِيه من رؤية الشويكات في نطاقٍ أضيقَ بثلاثِ أو أربعِ مراتٍ عمَّا رُصِد سابقاً؛ إذ بلغ عرْضُها نحو 200 كيلومتر فقط، وتتحرَّك بسرعاتٍ أكبرَ بكثيرٍ من غيرها. وُصِفت الشويكاتُ وَفْقاً لنوعِ الموجة المغناطيسية التي تجتاز الغِلافَ اللوني، وسُمِّيت إحدى الموجات موجةَ ألفين، نسبةً إلى هانز ألفين Hannes Alfvén الحائز جائزة نوبل في الفيزياء عامَ 1970 لدراسات مماثِلة. وهذا النوع من الموجات هو إحدى الآليات المنافِسة المفسِّرة لزيادةِ حرارة الإكليل الشمسي إلى درجاته المرصودة البالغة مليون درجة.

نظراً إلى أن الإكليلَ الشمسي أشدُّ حرارةً من سطح الشمس، فإننا نعلمُ بوجودِ آليةٍ محددة تمدُّ الإكليلَ الشمسي بالطاقة من الأسفل. إن العامل الحاسم في مُحاوَلةِ فَهْمِ كيفيةِ تدفُّقِ الطاقة من الغِلاف الضوئي لزيادة درجةِ حرارة الإكليل الشمسية يَكمُن في شكلِ الوسَط الواقع بين الغِلاف اللوني والإكليل الشمسي، وهو ما يُسمَّى بالمنطقة الانتقالية؛ لأن النظرياتِ المتنافِسةَ التي تفسِّر كيفيةَ انتقالِ الطاقة تتضمَّن أشكالاً هندسيةً مختلفة للبِنَى التي تتعرَّض للحرارة (الشكل 49).
ويستطيع الفلكيون دراسةَ المنطقةِ الانتقالية عن طريق النظر إلى صورِ الأيونات التي تُظهِر درجةَ حرارةٍ أعلى من درجةِ حرارةِ الغِلاف اللوني لكنها أبردُ من درجةِ حرارةِ الإكليل الشمسي، مثل الأكسجين المتأيّن خمسَ مرات. وإذا كان الغِلافُ اللوني مكوَّناً بالكامل من شويكات، دونَ وجودِ وسطٍ بينها، فهذا يعني أن الإكليلَ الشمسي يتصلُ بنهاياتِ الشويكات، وتكونُ المنطقةُ الانتقالية هي تلك المنطقة المحيطة بجوانبِ الأشواك. يَخضعُ هذا السؤالُ لدراسةٍ مستمرة بواسطةِ قمرٍ اصطناعي مستكشِفٍ صغير يُعرَف باسم «أيريس» IRIS (مِطْياف تصوير المنطقة البينية،

Interface Region Imaging Spectrograph) أطلقَتْه ناسا عامَ 2013. يحتوي أيريس علـى مِطْيافٍ وجهازِ تصويرٍ معاً، يَعْملان في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية التي يُمكِن فيها ملاحظةُ الخطوط الطيفية للغِلاف اللوني والمنطقة الانتقالية.

هل يُمكِننا رؤية الشويكات على القُرص الشمسي؟

لَطالما أُثِير الجدلُ حول مُطابَقةِ مَعالِمِ القُرص الشمسي للشويكات التي تَظهر علـى حافةِ الشمس. ومـن المدهش أن الإجابةَ عــن هـذا السؤال صعبةٌ للغاية؛ لأنَّ أيَّ شويكةٍ لا تَدوم طويلاً للحد الذي يُتِيح لنا رؤيتَها وهـي تنتقلُ من القرص إلـى الطرف. وأثمرتْ مُحاوَلاتُ تتبُّعِ قواعدِ الشويكات على القرص نتائجَ غامضةً تشير أحياناً إلى أن الشويكات تتوافق مع عناصرَ صغيرةٍ ساطعة على القُرص الشمسي، وأحياناً مع عناصر صغيرة داكنة. وهناك أشكال زُهيراتٍ ذاتُ مَعالِمَ داكنةٍ على القرص ربما تكون شويكات.

التلسكوب الشمسي المستقبلي

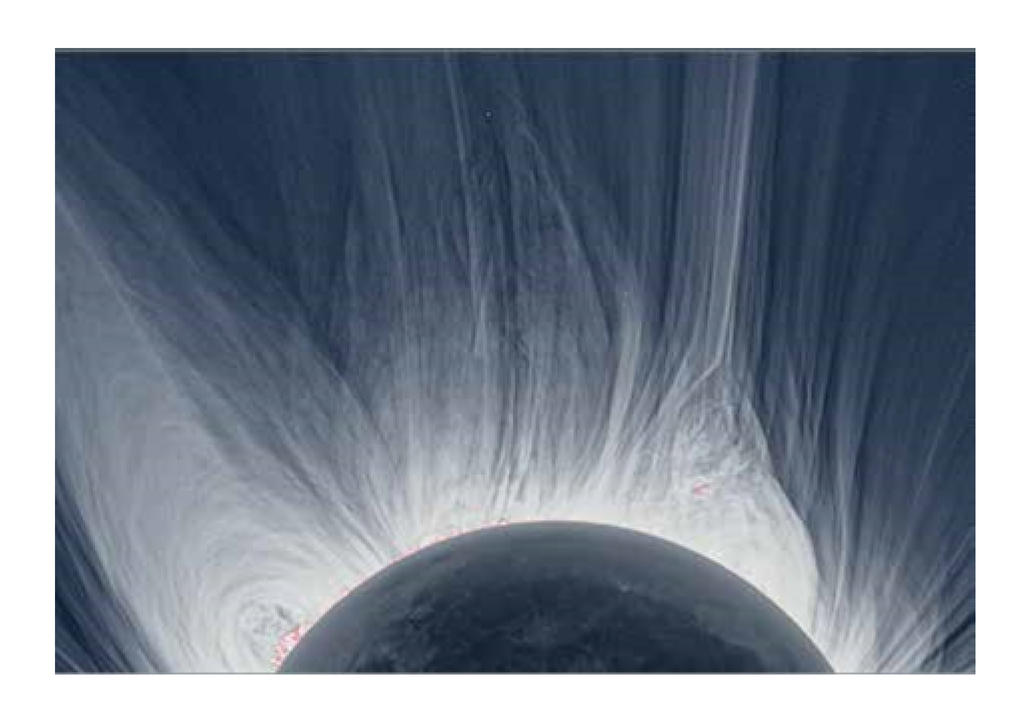
فـي الوقت الحالي، يُعد «تلسكوب دانيال كيه إينوي الشمسي» Daniel K. Inouye Solar Telescope المشـروعَ الأكبرَ فـي الفيزيـاء الشمسية، وقد أُعِيدت تسميتُه بهذا الاسمِ نسبةً إلى دانيال إينوي Daniel Inouye السيناتور من هاواي، بعدَ أن ظلَّ لفترةٍ طويلة يُسمى «التلسكوب الشمسي المتطوِّر التقنية»، Advanced Technology Solar Telescope. يبلغ ارتفاعُ قبة التلسكوب 3 آلاف متر (10 آلاف قدم) ويوجد فوق قمةِ بركان هاليكالا في جزيرة ماوي في هاواي، وما زال التلسكوب وأجزاؤه الداخلية الأخرى قيْدَ الإنشاء، ومن المتوقَّع اكتمل بناؤه في عام 2019، بتمويلٍ من مؤسسةِ العلوم الوطنية الأمريكية (الشكل 50).

سيتمكَّن «تلسكوب دانيـال كيـه إينـوي الشمسـي» مـن تصويرِ الغِلاف اللونـي للشمـس بمستوياتِ دقةٍ غيرِ مسبوقة. ومن بين مميزاته أنه يمتلك أكبرَ مرآةٍ لتلسكوبٍ شمسي على الإطلاق؛ إذ يزيد قُطْرُها عن أربعة أمتار. ومن المتعارَف عليه منذ زمنٍ بعيد أن حجمَ التلسكوبات الشمسية ليس من الضروري أن يكونَ كبيراً مثل حجمِ تلسكوباتِ الرصد الليلي، نظراً إلى أن الشمسَ شديدةُ السطوع، لكن في وقتنا الحالي يَنشرُ علماءُ الفيزياء الشمسية الطيفَ الشمسي بدرجةٍ كبيرة، ويجعلون حجمَ الصورة كبيراً جداً إلى درجةٍ تجعلهم بحاجةٍ للضوء، خاصةً بعد أن أدركوا أن التعرُّضات الضوئية يجب أن تكونَ قصيرةً لأن الشويكاتِ وعناصرَ الغِلاف اللوني الأخرى تتغيَّر بسرعة مهولـة. وللتعامُل مـع التشويـش الناجـم عن غِلافنا الجوي المعتـم، سيحتوي هذا التلسكوب على «بصرياتٍ تكيُّفية» - أيْ ستكون المرآةُ الرئيسة رقيقةً بدرجةٍ كافية، فلا يتجاوز سُمْكها 75 مليمتراً - بحيث تستطيع المحرِّكاتُ الموجودة خلفَها التسبُّبَ في انحرافها للتعويض عن التشوهات الناتجة عن مقدِّمات الموجات الساقطة مـن الغِلاف الجوي. لقد تطلبت تلك التقنياتُ البصرية التكيُّفية أيضاً التطوُّراتِ السريعةَ التـي شهِدَها مجالُ الحَوْسـبة فـي السنوات الأخيرة. ومـن

المفترَض أن يَرصدَ هذا التلسكوبُ العناصرَ الشمسية في حدودِ عُشر ثانيةٍ قوسية؛ أيْ لمسافة 70 كم على الشمس تقريباً، وهو أفضلُ بنحو عشْرِ مراتٍ من الحد القديم للرؤية الأرضية الممتازة.



50- أعمالُ بناءِ «تلسكوب دانيال كيه إينوي الشمسي» في هاليكالا في ماوي في هاواي، بتاريخ يناير 2016.



51- صورةٌ للكسوف، خضعتْ لمُعالَجةٍ عالية من مجموعةٍ متنوعة من الصور لإبرازِ المَعالِمِ الدقيقة للإكليل الشمسي.

الفصل السادس
الإكليل الشمسي المرئي

عندما نقف في موقعٍ يَشهدُ كسوفاً شمسياً كلياً، فإننا إمَّا أن نكونَ في مكانٍ يبدو عادياً أو نكونَ قد قطَعْنا مسافةً طويلةً حول العالَم. لكننا نعرفُ العلماءَ الذين تنبَّؤوا بأننا في ذلك الوقت المحدَّد سنصبحُ في ظلِّ القمر ونثِقُ بهم. يبدأ القمر فـي حجبِ الشمسِ جزئياً قبل ساعةٍ أو أكثرَ من الكسوف الكلي، لكنْ لوقتٍ طويل يَصعُب على المرء مُلاحَظةُ حدوثِ أي شيء. وربما كان جميع مَن حولك يمارسون أعمالَهم، غيرَ واعِين تماماً بالمفاجأة التي تنتظرهم. ولكن، قبل نحو خمس عشرة دقيقة من الكسوف الكلي يصبح ضوءُ النهار غريباً، ولا يَسَعُك تحديدُ السبب. وتدركُ متأخراً تغيُّرَ الظلالِ بشكلٍ ما؛ إذ لم تَعُد ناتجةً عن سقوطِ أشعة قرص الشمس الكامل، نصف درجة عرضـاً، وإنما بسببِ أشعةِ هلالٍ صغير؛ ولذلك تبدو الظلال أكثرَ حدةً.

خلالَ الدقائقِ القليلة الأخيرة التي تسبق الكسوفَ الكلي، تصبح السماءُ أشدَّ قتامةً بشكلٍ ملحوظ. لكنَّ سطوعَ الشمس يتجاوزُ سطوعَ البدر بمليون ضِعْف؛ ولذلك حتى عندما يتبقَّى 1% - واحد من مئة - فقط من شمسِ النهار، يُعادِلُ سطوعُ الجزء المتبقي 10 آلاف مرة تقريباً قدر سطوعِ البدر المكتمِل ليلاً، ويظل ضوءُ النهار ظاهراً. فالجزءُ الهلالي الضئيل المتبقي من الشمس يكون صغيراً، ولكنه شديدُ السطوع؛ لذا يظل التحديقُ المباشِر في الجزء المتبقي من قرص الشمس غيرَ آمِن، ولمُشاهَدة الهلال الشمسي ستحتاجُ إلى «نظَّارات الكسوف» المُتاحة بوفرة مُتزايدة (والأفضل وصْفُها بـ «نظَّارات الكسوف الجزئي» - راجِع المُلحَقَيْن 1 و2 للحصول على إرشاداتِ المُشاهَدة الآمِنة). وحتى الصورُ الفوتوغرافية لن تكون إلا صوراً شديدةَ الضبابية لتعرُّضِها إلى ضوءٍ شديد، ولن يَظهرَ فيها الهلالُ الشمسي.



52- خلال الكسوف الكلي للشمس، يَظهر الإكليلُ الشمسي مُحيطاً بالصورة الظلية للقمر، ويغطِّي زاويةً لا تزيد عن ربع قُطْر إبهامك عند نهايةِ ذراعِك الممدودة.

ثم تزدادُ وتيرةُ تغيُّرِ الأحداث. يَحجبُ القمرُ الشمسَ بالكامل تقريباً، ولا يُرى إلا حبَّاتٌ قليلة للغاية من ضوءِ الشمس؛ إذ تظلُّ الأجزاءُ الأخيرة من شمسِ النهار مرئيةً في الوديان التي تُحاذِي حافةَ القمر تجاهكَ. سُميت هذه «الحبَّات» beads بهذا الاسم نسبةً إلى عالِم الفلك الإنجليزي فرانسيس بيلي الذي شاهَدَها في كسوفِ عامِ 1836 وكتب عنها. وشاهَدَ فرانسيس وليامز Francis Williams، الباحثُ في جامعة هارفارد هذه الحباتِ في وقتٍ سابق خلال كسوفِ عامِ 1780، ورصَدَها من مكانٍ نعرفه الآن باسمِ ولاية مين، بالرغم من أنها كانت آنذاك جزءاً من ماساتشوستس، وتقع خلفَ خطوطِ العدو (أي المناطق البريطانية) بالنسبةِ لعلماءِ الفلك الأمريكيين.

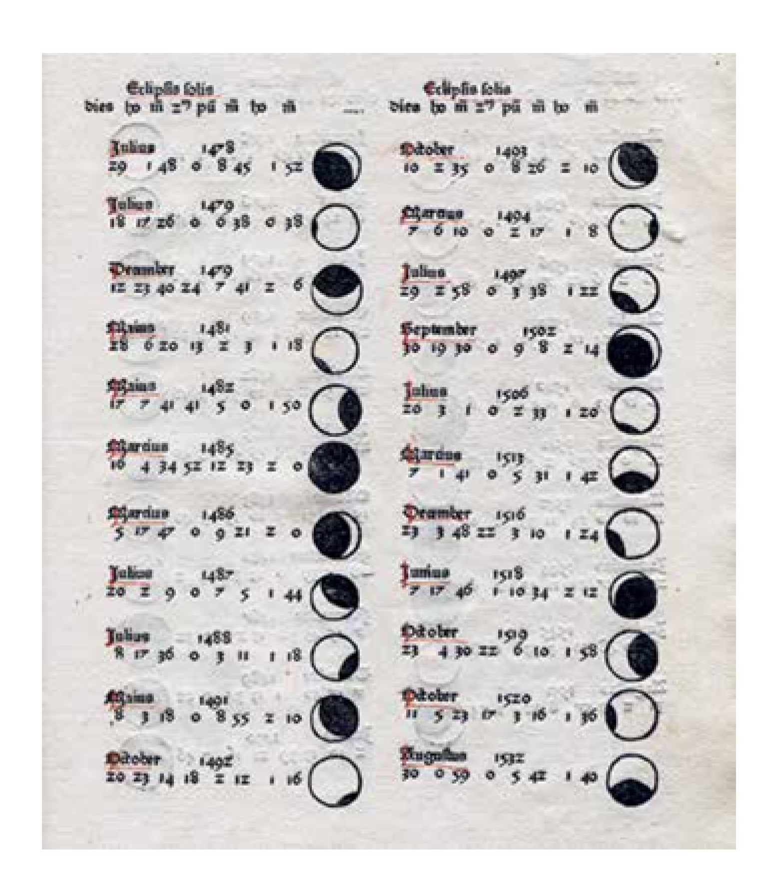
تبدو آخِرُ حبَّةٍ من ضوء الشمس - وعادةً ما تكونُ هناك حبَّةٌ واحدة فقط - جميلةً جداً وساطعةً نسبياً مُقارَنةً بالسماء المظلِمة، واشتُهِر هذا التأثيرُ منذ الكسوف الكلي الذي شهِدَتْه مدينةُ نيويورك عامَ 1925 باسمِ تأثير الحلقة الماسية. عندئذٍ فقط يُمكِنُك خلْعُ نظَّاراتِ الكسوف الجزئي بأمانٍ والنظرُ مُباشَرةً إلى تلك الظاهرةِ السماوية.

وعندما تختفي الحلقةُ الماسية، يصبح بالإمكان رؤيةُ هالةٍ halo محيطة بالشمس (الشكل 52). تُعرَف تلك الهالةُ باسمِ الإكليل الشمسي (corona)، نسبةً إلى الكلمةِ اللاتينية التي تَعْني «إكليل» أو crown بالإنجليزية. ووصَفَها إدموند هالي، المشهور بدراسته للمُذنَّبات، بأنَّ لها «بياضَ اللؤلؤ»، وظلَّ هذا الوصفُ عالقاً بالأذهان.

اكتشاف الإكليل الشمسي

عُرِف كسوفُ الشمس منذ آلاف السنين، ولا شكَّ في أن عرْضَ صورةٍ هلالية، غيرِ دائرية، خلال الكسوف باستخدامِ ما نسمِّيه الكاميرا ذات الثقب، ربما ساهَمَ في اكتشافِ قوانينِ علمِ البصريات والتصوير. (ربما تكونُ الفجواتُ بين أوراقِ الشجر أو الثقوبِ التي يصنعها وتِدُ الخيمة أدَّتْ دورَ الثقب الذي يَعرضُ الصورة، وربما يشير مصطلحُ «الثقب» بشكلٍ خاطئ إلى ثقبٍ أصغرَ من المستخدَم أو القابلِ للاستخدام). لذا ربما كان التصويرُ العرضي خلال الكسوف هو الخطوةَ الأولى في سلسلةِ خطواتِ التصوير البصري التي أدَّتْ في النهاية إلى ظهورِ الكاميرا الثابتة والكاميرا ذات فيلم التصوير وكاميرا الفيديو، ممَّا جعَلَنا ننتقل إلى السينما والتلفزيون اليومَ، وكلها نسْلٌ بعيد يَنحدر من ظاهرةِ كسوف الشمس.

ولكن لآلافِ السنين اكتفى كثيرون بالتعليق على الكسوف أو قياسِ توقيتِ حدوثه، ولم تُظهِر الرسومُ الإيضاحية إلا الأهلة الشمسية (الشكل 53). إن حجمَ الهلال ومعرفةَ ما إذا كانت الشمسُ محجوبةً بالكامل في موقعٍ معين أمران يُمكِن تدوينُهما وحفْظُهما عبرَ العصور. استطاع فرانسيس ريتشارد ستيفنسون Francis Richard Stephenson الباحثُ بجامعة درهام، الاستعانةَ بالمواضعِ المذكور فيها حدوث الكسوف الشمسي، منذ أكثرِ من ألفَيْ عامٍ، لحساب التغيُّرات في معدلِ دورانِ الأرض بمرور الزمن. معلومٌ على أي حالٍ أنَّ معدلَ دورانِ الأرض حول نفسِها عند خط الاستواء يبلغ 30 كم/دقيقة، ومن السهل ملاحظةُ ما إذا كانت الشمس، في أيِّ مكانٍ محدَّد، قد تعرَّضت إلى كسوفٍ كلي أم لا، وهكذا فإنه حتى التعليقات العامة الواردة في مخطوطٍ قديم بإمكانها الكشفُ عمَّا إذا كان هناك كسوفٌ كلي أم لا. ويُمكِننا أن نحسبَ بدقةٍ شديدة معدلَ دورانِ الأرض الذي من الممكن أن يَنتج، أو لا ينتج، عنه حدوثُ كسوفٍ كلي، وتحديد الموقع بالضبط.



Eclipsis solis

	dies	ho	mi	2ª	pū	mi	ho	mi
Julius 1478	29	1	48	0	8	45	1	52
Julius 1479	18	17	26	0	6	38	0	38
December 1479	12	23	40	24	7	41	2	6
Maius 1481	28	6	20	13	2	3	1	18
Maius 1482	17	7	41	41	5	0	1	50
Martius 1485	16	4	34	52	12	23	2	0
Martius 1486	5	17	47	0	9	21	2	0
Julius 1487	20	2	9	0	7	5	1	44
Julius 1488	8	17	36	0	3	11	1	18
Maius 1491	8	3	18	0	8	55	2	10
October 1492	20	23	14	18	2	12	1	16

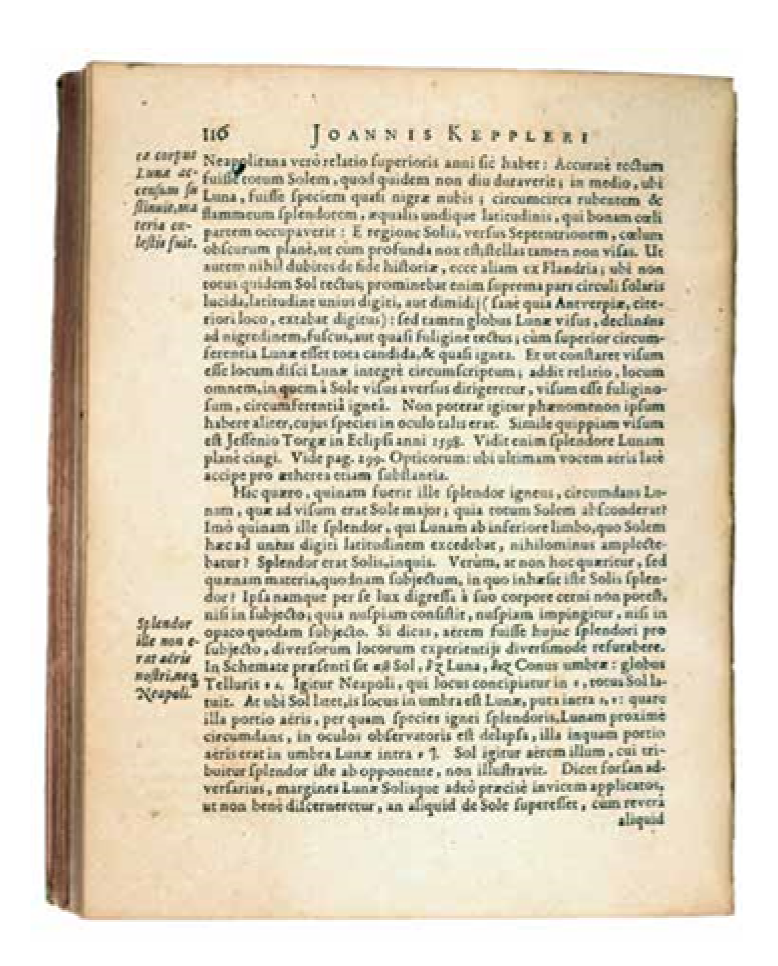
Eclipsis solis

	dies	ho	mi	2ª	pū	mi	ho	mi
October 1493	10	2	35	0	8	26	2	10
Martius 1494	7	6	10	0	2	17	1	8
Julius 1497	29	2	58	0	3	38	1	22
September 1502	30	19	30	0	9	8	2	14
Julius 1506	20	3	1	0	2	33	1	20
Martius 1513	7	1	41	0	5	31	1	42
December 1516	23	3	48	22	3	10	1	24
Junius 1518	7	17	46	1	10	34	2	12
October 1519	23	4	30	22	6	10	1	58
October 1520	11	5	23	17	3	16	1	36
Augustus 1532	30	0	59	0	5	42	1	40

53- صفحةٌ تعرضُ صورَ كسوفِ الشمس، تعودُ إلى القرن الخامس عشر: تقويم فلاوم Pflaum.

كان عالِمُ الفلك العظيم يوهانس كِبلر أولَ مَن أشار بوضوحٍ إلى الإكليل الشمسي، وذلك في عام 1604، في كتابه «الجزء البصري من علم الفلك» (Astronomiae pars optica)، ثم في عام 1606، في كتابه الذي وصَفَ المستعرَ الأعظمَ لعام 1604. وفي عام 1605، ألَّفَ كبلر كتيباً عن الكسوف مكوَّناً من ستَّ عشرةَ صفحة، وصَفَ فيه سلسلةً من ظواهر الكسوف، من بينها الكسوفُ الذي شهِدَه ذاك العام. لكن هذا الكتيبَ لا يصِفُ أيَّ شيءٍ يخصُّ شكلَ الكسوف. ومن ناحيةٍ أخرى، كتب كبلر في كتابه «النَّجْم الجديد» (New Star) الصادِر عامَ 1606، ما يلي، وهو مُترجَم هنا من اللاتينية (الشكل 54):

حُجِبت الشمسُ بالكامل، لكن هذه الظاهرة لم تَدُم طويلاً. في المنتصف، حيث كان القمر، تشكَّل ما كان يشبه سحابة سوداء يحيطها بالكامل وهَجٌ ساطع ضارِب إلى الحُمْرة، يمتدُّ في نطاقٍ منتظم، ويشغل جزءاً كبيراً من السماء (ترجمة إدان ديكيل، كلية وليامز).



116 JOANNIS KEPPLERI

ex corpus Lunæ accensum ſu ſtinuit, materia cœleſtis fuit.

Neapolitana verò relatio ſuperioris anni ſic habet: Accuratè rectum fuiſſe totum Solem, quod quidem non diu duraverit; in medio, ubi Luna, fuiſſe ſpeciem quaſi nigræ nubis; circumcirca rubentem & flammeum ſplendorem, æqualis undique latitudinis, qui bonam cœli partem occupaverit: E regione Solis, verſus Septentrionem, cœlum obſcurum planè, ut cùm profunda nox eſt, ſtellas tamen non viſas. Ut autem nihil dubites de fide hiſtoriæ, ecce aliam ex Flandria; ubi non totus quidem Sol tectus; prominebat enim ſuprema pars circuli ſolaris lucida, latitudine unius digiti, aut dimidij (ſanè quia Antverpiæ, citeriori loco, extabat digitus): ſed tamen globus Lunæ viſus, declinans ad nigredinem, fuſcus, aut quaſi fuligine tectus; cùm ſuperior circumferentia Lunæ eſſet tota candida, & quaſi ignea. Et ut conſtaret viſum eſſe locum diſci Lunæ integrè circumſcriptum; addit relatio, locum omnem, in quem à Sole viſus averſus dirigeretur, viſum eſſe fuliginoſum, circumferentiâ igneâ. Non poterat igitur phænomenon ipſum habere aliter, cujus ſpecies in oculo talis erat. Simile quippiam viſum eſt Jeſſenio Torgæ in Eclipſi anni 1598. Vidit enim ſplendore Lunam planè cingi. Vide pag. 299. Opticorum: ubi ultimam vocem aëris latè accipe pro ætherea etiam ſubſtantia.

Hic quæro, quinam fuerit ille ſplendor igneus, circumdans Lunam, quæ ad viſum erat Sole major; quia totum Solem abſconderat? Imò quinam ille ſplendor, qui Lunam ab inferiore limbo, quo Solem hæc ad unius digiti latitudinem excedebat, nihilominus amplectebatur? Splendor erat Solis, inquis. Verùm, at non hoc quæritur, ſed quænam materia, quodnam ſubjectum, in quo inhæſit iſte Solis ſplendor? Ipſa namque per ſe lux digreſſa à ſuo corpore cerni non poteſt, niſi in ſubjecto; quia nuſpiam conſiſtit, nuſpiam impingitur, niſi in opaco quodam ſubjecto. Si dicas, aërem fuiſſe hujus ſplendori pro ſubjecto, diverſorum locorum experientijs diverſimodè refutabere. In Schemate præſenti ſit αβ Sol, δζ Luna, δεζ Conus umbræ: globus Telluris ι κ. Igitur Neapoli, qui locus concipiatur in ι, totus Sol latuit. At ubi Sol latet, is locus in umbra eſt Lunæ, puta intra κ, ε: quare illa portio aëris, per quam ſpecies ignei ſplendoris, Lunam proximè circumdans, in oculos obſervatoris eſt delapſa, illa inquam portio aëris erat in umbra Lunæ intra ε η. Sol igitur aërem illum, cui tribuitur ſplendor iſte ab opponente, non illuſtravit. Dicet forſan adverſarius, margines Lunæ Soliſque adeò præciſè invicem applicatos, ut non benè diſcerneretur, an aliquid de Sole ſupereſſet, cùm reverà aliquid

Splendor ille non erat aëris noſtri, neq; Neapoli.

54- وصف يوهانس كبلر الإكليل الشمسي للمرة الأولى، وهو مذكورٌ في هذا المقتطَف من كتاب «De Stella nova in pede serpentarii» (عن النجم الجديد أسفلَ كوكبة الثعبان) (1606).

وإلى جانبِ اللونِ المحمرِّ المنسوب إلى الظاهرة، وحجْمِها التقريبي، يبدو أن الوصفَ بشكلٍ عام يُطابِق وصْفَ الإكليل الشمسي والتأثيرات البصرية المختلفة التي تسبقُ الكسوفَ الكلي وتَعْقبه. ولكن يبدو أن كبلر ظنَّ أننا نرى الغِلافَ الجوي للقمر مُضاءً في الخلفية نتيجةَ سطوعِ قرصِ الشمس المحجوب.

أين يوجد الإكليل الشمسي؟

ربما تتشكَّل هالةٌ، أو إكليلٌ، حولَ الصورةِ الظلية للقمر في أثناءِ الكسوف الكلي للشمس، ولكن ما الإكليلُ الشمسي تحديداً؟ أهو الغِلافُ الجوي للقمر؟ بالرغم من أننا في القرن الحادي والعشرين، ما زال بعضُ الناس (ما خلا علماء الفلك) يُخطِئون ويعتقدون ذلك. رُصِدت ظاهرتا الكسوف لعامَيْ 1715 (الشكل 55) و1724 من موقِعَيْن شديدَي التباعُد في أوروبا، وكان شكلُ الإكليل الشمسي

متطابقاً في كلا الموقِعَيْن. وإذا افترَضْنا وجودَ هذا الإكليل على سطح القمر؛ أيْ أنه يَبعدُ عن الأرض مسافةَ 400 ألف كيلومتر فقط، وليس على الشمس التي تبعد عنَّا مسافة 150 مليون كيلومتر (أبعدَ بنحو 400 مرة)، لَاختلَفَ شكلُ الإكليل عند مُشاهَدتِه من أحدِ المواقع مُقارَنةً بغيره من المواقع، وهو أثرٌ يُعرَف باسم اختلافِ المنظور. (لاحِظْ أثرَ اختلافِ المنظور بالنظر إلى جسمٍ بعيد يقعُ خلفَ إبهامِك في نهايةِ ذراعك الممدودة، مع النظر إليه في المرة الأولى بإحدى عينَيْك، والنظر إليه بعد ذلك بالعين الأخرى). علاوةً على ذلك، فقد شُوهِدَ القمر وهو يتحرَّك عبر الإكليل، ولم يُرصَد تحرُّكُ الإكليلِ مع القمر. وبهذا يتَّضِحُ أن الإكليلَ مرتبطٌ بالشمس ذاتِها وليس جزءاً من القمر. لقد أثارتْ هذه النقطةُ الجدَلَ لعقودٍ. وأثبَتَ الدليلُ الفوتوغرافي الملتقَط في كسوفِ عامِ 1860 أن الشُّوَاظَ الشمسي الساطعَ في حافةِ الصور الظلية للقمر لم يُظهِر اختلافاً في المنظور؛ وهو ما ساهَمَ في إقناعِ العلماء بأن الإكليلَ شمسيٌّ.

مِمَّ يتألَّف الإكليل الشمسي؟

في القرنِ التاسعَ عشرَ، نُظِّمت بعثاتٌ استكشافية للسَّفَرِ ودراسةِ ظواهر الكسوف. واشتهر كسوفُ عامِ 1868 خاصةً بسفرِ العديد من البعثات الاستكشافية إلى الهند لدراسته. (كما حدَثَ في سيام، التي تُعرَف الآن بتايلاند، وقد تُوفِّي ملك سيام الشهير مونغكوت Mongkut، الذي خلَّدَ رودجرز Rodgers وهامرستاين Hammerstein ذِكْراه في مسرحيتهما الغنائية «الملك وأنا» (The King and I)، بسببِ الملاريا التي أصابَتْه خلالَ رحلتِه لمُشاهَدةِ الكسوف الكلي الذي شهدته بلاده).

وفي كسوفِ عامِ 1868، اصطُحِب المِطْيافُ المُخترَع حديثاً إلى الهند، وظهر خطٌّ طيفي أصفرُ غريبٌ في الطيف عند حافةِ القمر. لم يَظهر هذا الخطُّ الطيفي، في المكان المتوقَّع لظهورِ زوجِ الخطوط الصفراء للصوديوم، خطِّ فراونهوفر ذو الرمز D، مما أشار إلى وجودِ عنصرٍ جديد سُمِّي الهيليوم كما ناقَشْنا في الفصل السابق. ولم يتمكَّن الكيميائيون من عزل الهيليوم الأرضي إلا في عام 1895. وبالطبع، أصبَحْنا الآن نعلمُ أنه العنصر الذي يَلِي الهيدروجين في الجدول الدوري للعناصر. وفي الكسوف التالي، في عامِ 1869 بالولايات المتحدة، رأى محلِّلو الطيفِ خطاً طيفياً أخضرَ اللون في الإكليل

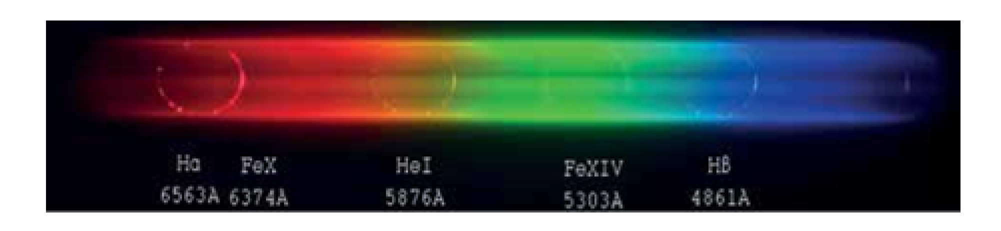


55- خريطةُ إدموند هالي لمسارِ الكسوفِ الكلي عام 1715، وكان ذلك أولَ وصفٍ لمسار الكسوف. وبعد حدوثِ الكسوف نشَرَ هالي تصحيحاً طفيفاً لمسارِ الكسوف كما رُصِد بالفعل، وقدَّمَ تنبؤاً لمسار كسوفِ عامِ 1724 عبرَ أوروبا أيضاً.

الشمسي (الشكل 56). وقياساً علـى اسم الهيليوم، أُطلِق عليه اسـم «الكورونيوم» لظهورِه في الإكليل الشمسي فقط. ولكن عندما وُضِع الهيليوم في الجدول الدوري أصبح الجدولُ ممتلئاً، ولـم يكُن هناك متَّسعٌ للكورونيوم. ولـم يُحل لغزُ الكورونيوم إلا بعدَ مُضِي سبعين عاماً أخرى.

وبشكلٍ عـام، لـم يكُن معلوماً حينـذاك أن الشمسَ والنجومَ الأخـرى تتألَّف بالكامل تقريباً من الهيدروجين؛ إذ تتألَّف بنسبة 90% من الهيدروجين، و9% من الهيليوم، وأقل من 1% من العناصر الأخرى. وأدَّت مُشاهَدةُ العديد من الخطوط الطيفية لعنصر الحديد، على سبيل المثال، إلـى استنتاجاتٍ مضلِّلة حول وجـودِ وفرةٍ كبيرة نسبياً من الحديد فـي الشمـس؛ مما يشير إلى وجودِ

نسبةٍ أعلى بكثير من النسبة التي نعرفها الآن. وبعد أطروحة الدكتوراه التي قدَّمتْها سيسيليا باين (التي عُرِفت لاحقاً باسم سيسيليا باين- غابوشكين) لكلية رادكليف، وإجراء نوعِ مُحسن من الحسابات، توصَّلْنا إلى نتيجةٍ مُفادُها أن الشمسَ والنجوم تتكوَّن بالكامل تقريباً من الهيدروجين. وحتى في ذلك الحين، لقِيَ الاستنتاجُ الذي توصَّلتْ إليه باين تشكيكاً من هنري نوريس راسل، عالِم الفلك البارز في جامعة برنستون. لكن بعد عامَيْن، وبظهور الحساباتِ الجديدة التي أجراها دونالد هوارد مينزل Donald H. Menzel، حازتِ النتيجةُ التي توصَّلتْ إليها باين، والتي أصبحتْ مقبولـةً الآن عالمياً، قبولَ راسل. (أتى مينزل إلى جامعة هارفارد في وقتٍ مقارب لحدوثِ الكسوف الكلي للشمس عام 1932، وفي خمسينيات القرن الماضي انتهى به المطافُ إلـى شغلِ منصب المدير، وأيَّدَ باين- غابوشكين وتأكَّدَ من حصولها على المكانة التي تستحقها بصفتها أستاذةً في علم الفلك. وفي عام 1976، حظِيَتْ بشرفِ الانضمام إلى قائمةِ مُحاضِري هنري نوريس راسل في الجمعية الفلكية الأمريكية).



56- الطيف الإكليلي في الكسوف الكلي للشمس لعام 2015، يَظهر خطُّ الانبعاث الأخضر عند الطول الموجي 530.3 نانومتر، المعروف سابقاً باسم الكورونيوم.

يَمْنحنا التحليلُ الطيفـي للإكليل الشمسـي نتائجَ مثمرةً بشكلٍ خاص في نطاقِ الأشعة تحت الحمراء. هناك ثلاثةُ خطوطٍ من الأشعة تحت الحمراء للحديد Fe XIII (حديد متأيِّن اثنتَي عشرةَ مرة، تذكَّرْ أن العنصرَ غيرَ المتأيِّن له طيفٌ يُسمَّى I، والحديدُ المتعادِل، على سبيل المثـال، يُسمَّى Fe I)، وأتاحـتِ التطوراتُ الإلكترونية الحديثـة فـي الكواشف تصويرَ أطوالٍ موجية لا تتجاوز عدةَ ميكرونات (الميكرون هو التسمية القديمة للميكرومتر، وهو جزءٌ من المليون من المتر)، أيْ أطول من الضوء الأحمر بمراتٍ قليلة. وسيرصُد أحدُ مؤلِّفَي الكتاب (ليون غولوب) طيفَ الأشعة تحتَ الحمراء في هذه المنطقة على متن طائرةٍ مجهَّزةٍ، خلال كسوفِ الشمس الكلي لعام 2017.

إن معظمُ الخطوط الإكليلية المعروفـة فـي نطاقِ الطيف المرئي تتشكَّل من الحديد أو الكالسيوم العالي التأيُّن، في وجودِ القليل من خطوطِ السيليكون أو الكبريت. لكنَّ كلَّ هذه الخطوط ثانوية، وخطـوط الطيف الأساسية للإكليل تقع في نطاقِ طيفِ الأشعة فوق البنفسجية القصوى أو الأشعة السينية، ويُمكِن رصْدُها من مَرْكبةٍ فضائية أو صواريخِ السبر، كما سنوضِّح في الفصل التالي.

ما مدى سخونة الإكليل؟

لا يُظهِر باطنُ الإكليل إلا عدداً قليلاً من الخطوط الطيفية، وتَظهر هذه الخطوطُ القليلة على هيئةِ خطوطٍ ساطعة (خطوطِ انبعاث) وقتَ الكسوف، في حين تبدو بقيةُ الخطوطِ الطيفية للإكليل شبيهةً إلى حد كبير، من حيث الشكل العام، بالخطوط الطيفية للغِلاف الضوئي البالغة حرارته 5800 كلفن. يبدو أن الإكليلَ يشتِّت الضوءَ الساطع للقرص الشمسي نحونا. ولكنْ، لماذا لا نرى خطوطَ امتصاصِ فراونهوفر في الطيف الإكليلي؟

للإجابة عن هذا السؤال نحتاج إلى فَهْمِ معنى كلمة «ساخن». من وجهةِ نظرِ الفيزيائي، يعني هذا المصطلحُ تحرُّكَ الجُسيمات بسرعةٍ كبيرة جِيْئةً وذَهاباً، مع زيادةِ سرعتها بارتفاعِ درجة الحرارة. ونظراً لتشتُّت الطيف الشمسي في طريقه إلينا، فإن بعضَ الجُسيمات الإكليلية التي تعكس الضوءَ تتحرَّك نحوَنا، وبعضها الآخَر يبتعد عنَّا. وإذا كانت الحرارةُ شديدةَ الارتفاع، تكون هذه الحركاتُ سريعةً للغاية، وتؤدي إزاحةُ دوبلر - التغيُّرات في الطول الموجي الناتجة عن الحركة نحوَ الراصد أو بعيداً عنه - إلى نَشْر خطوط الامتصاص (أي «توسيعها») بشكلٍ كبير إلى الحد الذي يَجْعلها تمتزجُ بالطيف المتواصِل في الخلفية ولا يُمكِن رؤيتها.

يُنسَب الفضلُ عادةً في تحديدِ درجةِ حرارة الإكليل الشمسي، البالغةِ ملايين الدرجات (ولا داعيَ للتذكرة بمُراعَاة الفرْقِ البالغ 273 درجة مئوية بين مقياسِ كلفن الذي يبدأ بالصفر المطلق، والمقياسِ المئوي الذي يبدأ عند نقطةِ تجمُّدِ الماء) إلى بينغت إدلين Bengt Edlén، في عام 1943. درس إدلين الطيفَ الإكليلي، الذي أظهَرَ عدداً قليلاً من خطوط الانبعاث، واحدٌ في نطاقِ اللون الأحمر، وواحدٌ في نطاقِ اللون الأخضر. يتأيَّن الغاز بشدةٍ عند وصولِ درجة الحرارة إلى الملايين، وينفصل إلى بروتوناتٍ، وذراتٍ وإلكتروناتٍ شديدةِ التأيُّن. ويُطلَق على هذا الغاز الشديد التأيُّن اسمُ «البلازما»، لكنك سترى غالباً أن البلازما تُعَد الحالةَ الرابعة للمادة إلى جانبِ الحالات الصلبة والسائلة والغازية. لم يكن بوسع أي مختبر آنذاك مُحاكاةُ طيفِ الحديد عند ملايين الدرجات، لكن إدلين توصَّلَ إلى عدةِ سلاسلَ من الخطوط على امتدادِ متوالياتٍ متساويةِ الإلكترونات: أيْ تسلسُل عناصرَ كيميائيةٍ مختلفة مرتَّبةٍ على امتدادِ الجدول الدوري ولها عددُ الإلكترونات ذاته، بحيث تكون درجةُ تأيُّنِ العناصر المتتابِعة التي لها عددٌ ذري أكبرُ أعلى من سابقتها. ويُمكِن استخدامُ تلك التسلسُلاتِ للتنبؤ بالأطياف المجهولة في حالِ معرفةِ أطيافٍ أخرى تنتمي إلى التسلسُل نفسه.

في عام 1939، أثبَتَ والتر غروتريان Walter Grotrian أن الخطَّ الأحمر الإكليلي يخصُّ الحديدَ Fe X، وهي حالةٌ يَفقدُ فيها الحديدُ تسعةَ إلكترونات. واستطاع إدلين تحديدَ أن الخطَّ الأخضر الإكليلي يخصُّ الحديدَ الذي فقَدَ ثلاثةَ عشرَ إلكتروناً، أيْ نصفَ إلكتروناتِ الحديد المتعادِل، وعددها 26 إلكتروناً. ولكي يَحدُثَ ذلك يجب أن تتخطَّى درجةُ الحرارة المليونَ درجة. وفي عام 1945، نال إدلين الوسام الذهبي من الجمعية الفلكية الأمريكية تكريماً لإسهاماته في حلِّ اللغز المعروف باسم لغز الإكليل.

في الواقع، لم يصرِّح أيٌّ من غروتريان أو إدلين في البداية بأن درجةَ حرارة الإكليلِ مرتفعةٌ إلى هذا الحد. وفي عام 1941 أجرى هانز ألفين، الفيزيائيُّ الحائز جائزة نوبل، دراسةً للأدلة المتاحة، نُشِرَت في مجلةٍ سويدية، ووضَعَ موجزاً يشملُ ستةَ أدلةٍ تفيد بأن الإكليل «يزداد سخونةً

وصولاً إلى درجاتِ حرارةٍ شديدةِ الارتفاع». ارتبط اسمُ ألفين بتأييد أهميةِ المجالات المغناطيسية والتيارات الكهربية في مواقف الفيزياء الفلكية، والمجالُ المغناطيسي مهمٌّ بالفعل في زيادةِ درجةِ حرارة الإكليل. وعادةً ما اتُّخذَت استنتاجاتُه حولَ درجةِ حرارة الإكليل الشمسي مَرْجِعاً، لكنها لم تَعُد الآن معروفةً على نطاقٍ واسع، وفي عام 2014 كتب هاردي بيتر Hardi Peter من ألمانيا، وبولا دويفيدي Bhola Dwivedi من الهند، ورقةً بحثية أشادا فيها بأعماله.

رَصْد الإكليل خارجَ الكسوف

على الرغم من أن الجزءَ الأطول من تاريخ رصْدِ الإكليل كان في نطاق الضوء المرئي، وأُجرِي بالعين البشرية أو بكاميرات مُكافِئة، فإن جُلَّ الإشعاع الصادر من الإكليل له أطوالٌ موجية أقصرُ، في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية أو الأشعة السينية. ونناقش في هذا الفصل التاريخَ الطويل لرَصْد الإكليل في نطاق الضوء المرئي، وسنبيِّن في الفصل التالي رصْدَ الإكليل في نطاق الأطوال الموجية الأقصر.

حتى في وقتنا الحالي، لا تَلْقى فكرةُ الوجود الدائم للإكليل في السماء تقديراً وافياً. فالإكليلُ أشدُّ خفوتاً من السماء الزرقاء لا أكثر، ولهذا فإنه لا يصير مرئياً إلا في فترةِ منتصفِ النهار عندما ينقشعُ الضوءُ المُشتَّت الذي تنتُج عنه السماءُ الزرقاء، وهو ما يَحدثُ عندما يمنع القمرُ ضوءَ الشمس العادي من الاصطدام بجزيئات الهواء.

ربما يُفِيدك تنصيبُ مُعَداتك فوق جبلٍ مرتفع في وجودِ هواءٍ نقي، لكنه لن يكونَ كافياً لتَمْكينك من رؤيةِ الإكليل دونَ كسوف. ستظل هناك كميةٌ كافية من الهواء لتشتيتِ ضوء الشمس الساطع، وهو ما يَحدُّ من قُدرةِ مُعَداتك على تكوينِ صورةٍ واضحة. لكنْ من الفضاء - كما هو الحال مع روَّادِ الفضاء على القمر أو في مَحطةِ الفضاء الدولية - يكون بإمكانك حجْبُ القرص الشمسي ورؤية الإكليل.

في عام 1963 في فرنسا، نجَحَ برنار ليو Bernhard Lyot، اختصاصيُّ المُعَدات البارع، في التوصُّلِ إلى طريقةٍ لكبْحِ تشتُّتِ الضوء الساطع في الغِلاف الضوئي إلى الحد الذي يَسْمح بتصوير الإكليل دونَ وجودِ كسوف. استخدَمَ ليو عدساتٍ بدلاً من المرايا، التي تشتِّت الضوءَ بسببِ التقزُّح الطفيف في طبقتها الخارجية. وصقلَ العدساتِ بعنايةٍ فائقة، وخاصةً باستخدامِ القليلِ من «دهون الأنف» (التي حصل عليها بمُلامَسةِ جانبِ أنفِه بإصبعه) الموزَّعة على العدسةِ بالتساوي. وداخل التلسكوب، اهتمَّ بإعدادِ مكوناتٍ ماصّة صغيرة ووضعها بدقة (تُعرَف عادةً باسم «عوائق ليو») لحجْبِ الضوء المنعكس من جهةٍ لأخرى بين الأسطح البصرية، والذي يَحِيد عند حوافِّ العناصر البصرية. وبهذه الطريقة استطاع رصْدَ باطنِ الإكليل من أعلى جبلٍ مرتفع. وتمكَّنَ أيضاً من رؤيةِ خطِّ انبعاثٍ إكليلي مصحوبٍ بمرشح محدودِ النطاق (لم يزل معروفاً حتى اليوم باسم «مرشح ليو») مُتمركزٍ عند الطول الموجي لهذا الخط لتوفيرِ زيادةٍ في السطوع النسبي مُقارَنةً بالإشعاع الشمسي المتواصِل.

بفضْـلِ التقدُّمِ الـذي أحرَزَه ليـو، أمكَنَ مُراقبـة باطنِ الإكليل على مدارِ دورةِ البُقَع الشمسية. ومن المواقع التي يوجد بها مرسام الإكليل: محطـة مرصـد المنسوب المرتفع فـي كليماكس بكولورادو، ومرصد ساكرامنتو بيك في صن سبوت بنيومكسيكو، ومرصد بيك دو ميدي في فرنسا. وأفضلُ موقعٍ حالي لمرسام الإكليل هو ماونا لوا، ويقع فوق قمةِ جبلٍ ارتفاعُه حوالي 4 آلاف متر (14 ألف قدم) بجزيرة هاواي (الشكل 57).



57- صورةٌ معاصرة التقَطَها مرسامُ الإكليل من فوق مرصد ماونا لوا في هاواي. تشير الدائرةُ البيضاء إلى مكانِ وجودِ حافةِ الغِلاف الضوئي خلفَ القرصِ الحاجب.

ومع ذلك، فإن أفضلَ الصور التي التقطها مرسامُ الإكليل في هذه المراصد الموجودة على قِمَم الجبال لا تضاهي تفاصيلَ أو مدى الإكليل كما يُرى وقتَ الكسوف. ولا تمتدُّ الصورُ إلى الأسفل لتشملَ سطحَ شمسِ النهار؛ لأننا بحاجةٍ إلى حجْبِ الغِلاف الضوئـي الساطع، ولذلك هناك دائماً فجوةٌ ما، وهذه الفجوةُ يُمكِن ملْؤُها بشكلٍ مثالي في الكسوف في تلك الأيام الخاصة بالكسوف كلَّ ثمانيةَ عشرَ شهراً أو نحو ذلك.

يوجـد عددٌ قليل مـن أجهزةِ تصويرِ الإكليل فـي الفضاء فوقَ الغِلاف الجوي للأرض. وأشهرُ هذه الأجهزةِ ذلك الجهاز الموجود على متن «مرصد الشمس وغِلافها»، المعروف اختصاراً باسم «سوهو»، وهو قمرٌ اصطناعي تابعٌ لوكالة الفضاء الأوروبية، أُطلِق في عام 1995 ويَحملُ على متنِه مرساماً إكليلياً من صنعِ وتشغيلِ مختبرِ أبحاثِ البحرية الأمريكية. (كما سنرى فـي الفصل التالي، يَنخرطُ مختبرُ أبحاثِ البحرية الأمريكية في مجال الطاقة الشمسية والفضاء منذ دعوته إلـى استخدامِ بعض الصواريخ الألمانية من طرازِ 2 -V لتجرِبتها فـي نهاية الحرب العالمية الثانية).

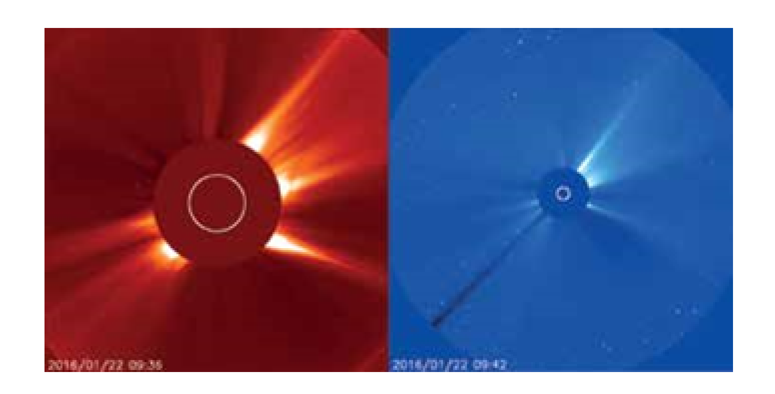
وقد شُيِّدَ بالتعاوُنِ مع جامعة برمنجهام في المملكة المتحدة، ومختبر الفيزياء الفلكية في فرنسا، ومعهد ماكس بلانك لدراسة الأجواء العليا في ألمانيا.

تَحملُ المَرْكبةُ «سوهو» علـى متنهـا ثلاثةَ أجهزةِ تصويرٍ إكليلي، تغطِّـي مجالاتِ رؤيةٍ أكبرَ تباعاً، من داخلِ الإكليل الشمسـي إلـى خارجِه، وتُسمى: سي1، وسي2، وسي3. يُعَد سي1 المرسامَ الوحيد الذي ينتمي إلـى النـوع الذي ابتكره ليو، وبه قرصٌ داخلي يَحجبُ صورةَ الغِلاف الضوئـي للشمس. وقد عانـى هذا الجهازُ من تشتُّتٍ داخليٍّ شديدٍ للضوء، لدرجة جعلته غير نافع حقاً، بالرغم من مُطابَقتِه لتصميم ليو. وبعدها فـي عام 1989، خرجتِ المَرْكبة «سوهو» عن السيطرةِ عندما اختلَّ نظامُ التوجيه الخـاص بها بسببِ عدمِ اكتمالِ قُرص الشمس المستدير، وهو الشيء المرئـي الوحيد فـي أثناء كسوف الشمس. توقَّفتِ المركبةُ الفضائية عن نشاطها، وعندما تمكَّنَ رائدُ فضاءٍ من السيطرة عليها وإعادتها للعمل، ظلَّ مرسامُ الإكليل مُعطلاً. (رتَّبَ أحدُ مؤلِّفَي الكتـاب مُحاوَلاتٍ لرصْدِ الكسـوف باستخدامِ كاميرا مصمَّمةٍ لمُطابَقةِ مجالِ رؤيةِ مرسامِ الإكليل سي1، لمقارَنةِ الضوء المتشتِّت بالمشهد الإكليلي، فـي حـالِ التقاطِه بالمصور سـي1، بالمشهد الملتقَط من الأرض فقط، وتَظهر فيه سماءٌ مُظلِمة في الخلفية وقتَ الكسوف الكلي). كانت بياناتُ «تجربة مرسام الإكليل الطيفي الواسع الزاوية» (لاسكو، lasco) التي أجراها مختبرُ أبحاثِ البحرية الأمريكية كالآتي: الصور التي التقطها مرسام الإكليل سي1 تغطي 1.1 إلى 3 أنصافِ أقطارٍ شمسية (معهد ماكس- بلانك)، والصور التي التقطها سي2 تغطي 1.5 إلى 6 أنصافِ أقطارٍ شمسية (مختبر الفيزياء الفلكية في فرنسا)، والصور الملتقَطة من المرسام الإكليلي سي3 تغطي 3.5 إلى 30 نصفَ قطر شمسي (مختبر أبحاث البحرية الأمريكية). لاحِظْ أنَّ العُشْرَ الداخلي من نصفِ القُطْر الشمسي فوقَ الطرف الشمسي ظلَّ رصْدُه مُقيَّداً بوقت الكسوف، ولم يستطِعْ أيُّ مرسامٍ إكليلي من أجهزة «لاسكو» تغطيةَ تلك المنطقة.

تُعَد المَرْكبة «سوهو» قديمةً جداً، وعندما تتوقَّف عن العمل لن يكونَ هناك أيُّ مرسامٍ إكليلي في مدار الأرض. ونُقِلت بالفعل الصورُ الملتقَطة في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية على متن «سوهو» إلى نسخةٍ مُحسنة على متنِ مرصد ديناميكا الشمس.

في عام 2006، أطلقتْ ناسا «مرصد العلاقات الأرضية الشمسية» Solar TErrestrial RElations Observatory (ستيريو، STEREO)، وهو زوجٌ من المَرْكبات الفضائية، تَحملُ كلٌّ منهما مرساماً إكليلياً.

وتدور المَرْكبتان حول الشمس، إحداهما خارجَ مدار الأرض قليلاً، والأخرى داخلَه قليلاً، ومن ثم فإنهما تتحرَّكان تدريجياً حول الشمس - إحداهما متقدِّمة عن الأرض، والأخرى متخلِّفة عنها - كي تمدانا بزوايا رؤيةٍ مختلفة. وحتى عام 2016 قطعَتِ المركبتان أكثرَ من نصفِ مسارهما، وهما لا تقدِّمان رؤيةً ثلاثيةَ الأبعاد.



58- صورتان مُلتقَطتان في تجرِبةِ مرسام الإكليل الطيفي الواسع الزاوية (لاسكو)، سي2 على اليسار، وسي3 على اليمين، من مركبة الفضاء «سوهو».

ونعبِّر عن الاستقصاءِ الذي أجراه المرصدُ «ستيريو» لدراسةِ الاتصال بين الشمس والأرض على مستوى الإكليل والغِلاف الشمسي، Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation، بالاختصار «سيكي» secchi، وهو اختصارٌ يُطابِق اسمَ عالِمِ فلكٍ بارز اشتغل بدراسة الشمس في القرن التاسع عشر، وتحدَّثْنا عن عمله في الفصل السابق. ويحمل «ستيريو» مرساماً إكليلياً داخلياً من النوع الذي ابتكره ليو، ويُدِيره مركزُ غودارد لرحلات الفضاء، التابع لوكالة ناسا، ومرساماً إكليلياً خارجياً يُدِيره مختبرُ أبحاث البحرية الأمريكية، ومصوراً للغِلاف الجوي ذا مجالِ رؤيةٍ أوسعَ. يُسمَّى مرسام الإكليل الداخلي «كور1» COR1، ويغطي مجالَ رؤيةٍ يمتد من 1.3 إلى 4 أنصافِ أقطارٍ شمسية. ويُسمَّى مرسامُ الإكليل الخارجي «كور2» COR2، ويمتد حتى 15 نصف قطر شمسي. ويرصدُ مصورُ الغِلاف الشمسي والمغناطيسي، بجزأَيْه، ما يدور خارجَ مدار الأرض.

تصوير الإكليل في الضوء المرئي

يغطي الإكليلُ الشمسي نطاقَ سطوعٍ واسعاً، وينخفض السطوعُ بمعامل قَدْرُه حوالي 1000 من حافة الشمس إلى نصفِ قُطْرٍ شمسيٍ واحد إلى الخارج، لكن مَعالِمَ الإكليل تتسبَّب في تفاوُت هذا المعامل. وبمُواصَلةِ التحرك إلى الخارج يَخفتُ السطوعُ تدريجياً ولا يصبحُ بإمكانِ أيِّ جهازِ تصويرٍ التقاطُ النطاقِ الكامل لسطوع الإكليل. لذلك، حتى تفاصيلُ الأشكالِ الإكليلية تَضيعُ في الصور الفردية.

التُقِطت أولُ صورةٍ للإكليل في عام 1851، بعد اثنَيْ عشرَ عاماً فقط من التقاطِ لويس جاك ماندي داغير Louis- Jacques- Mandé Daguerre الصورَ الفوتوغرافية الأولى في فرنسا، بالتعاون مع فرانسوا أراغو François Arago، من مرصدِ باريس، على أملِ توجيهِ أساليبه الجديدة إلى علم الفلك. ويعود الفضلُ في صورةِ الإكليل الملتقَطة عام 1851، وهي من النَّمَط الداغيري، إلى «بيركويتز» Berkowitz، وهو على الأرجح يوهان جوليوس فريدريش

بيركوفسكي Johann Julius Friedrich Berkowski، الذي يُعَد أحدَ أمهرِ فنَّانـي النَّمَطِ الداغيري فـي مدينة كونيغسبيرغ (كالينينغراد حالياً).

ونظراً إلى أن النطاقَ الديناميكي للكواشِف الإلكترونية (وللأفلام سابقاً) محدودٌ كثيراً، مُقارَنةً بنطاقِ سطوعِ الإكليل، استُخدِمَت فـي السنوات الأخيرة تقنياتٌ حاسوبية مختلفة لتحديدِ أفضلِ الأجزاء من بين صورٍ عديدة. لكن فـي عام 1918، طلب المسؤولون عن بعثةِ دراسةِ الكسـوف المرسَلة إلـى أوريغـون، والتابعة لمرصد البحرية الأمريكية، من الفنَّان هوارد راسل بتلر Howard Russell Butler الانضمامَ إليهم. كانت لديه طريقةٌ خاصة لتدوينِ الملاحظات الخاصة بالتفاصيل والألوان، وصنَعَ لوحةً زيتية لاحقاً. وأظهَرَ رسْمُه الملوَّن الناتجُ تفاصيلَ أكثرَ بكثير عن الأشكال الإكليلية مُقارَنةً بالتفاصيل التي أتاحها التصويرُ الفوتوغرافي آنذاك. وواصَلَ بتلر رسْمَ ظواهرِ كسوفِ الشمس في الأعوام 1923، و1925، و1932 (الشكل 60).



59- طباعةٌ حجريةٌ تعود لعام 1881 تُظهِر رسماً مُنمَّقاً لكسوفٍ كلي للشمس من عملِ إتيان ليوبولد تروفيلوت. يتوافق الرسمُ مع صورةِ الكسوف بالقربِ من الحد الأدنى لدورةِ البُقَع الشمسية، ويُظهِر الشَّفَقَ الاستوائي والأعمدةَ القطبية. ويُظهِر أيضاً الغِلافَ اللوني والشُّوَاظَ الضارِبَيْن إلى الحُمرة.

وتعود ملكيةُ النُّسَخِ الأصلية ذاتِ الحجم الكامل من هذه الرسومات، التي يصل ارتفاعُها إلـى مترَيْن (أكثر من 6 أقدام)، إلى المتحف الأمريكي للتاريخ الطبيعي فـي نيويورك، وهي معلَّقةٌ عند مدخلِ قُبَّةِ هايدن السماوية منذ عقود. وتوجد أيضاً نُسَخٌ عديدة بنصفِ الحجم، من بينها تلك المعروضةُ

في معهد فرانكلين في فيلادلفيا، وفي برنستون، علاوةً على نُسَخٍ - غير معروضة - في متحف جزيرة ستاتن ومتحف بافالو للعلوم.

فـي الوقـت الحالي، يَصنعُ عالِمُ الحاسوب التشيكي ميلوسلاف دروكمولر Miloslav Druckmüller، مركبـاتٍ حاسـوبيةً أسـاسية مَعْنيَّةً بالكسوف، تَعرضُ تفاصيلَ لمسافاتٍ شـاسعة مـن سـطح الشمـس وتعـزّز تبايُنَ المَعالِمِ الإكليليـة. وقـد استخدَمَ عشراتِ الصور الفردية الملتقَطة بتعريضاتٍ ضوئية مختلفة. والصورُ الفردية، التـي عـادةً ما تُلتقط بكاميـرات كانــون أو نيكون عادية، تُعالَج بمجموعةٍ كاملـة مـن الإجراءات التـي تُخصَّص عـادةً للبيانات العلمية، مثل اسـتبعاد الإطارات «المعتمة» والأُطر «المُتحيـزة» لتقليلِ تشويشِ الخلفيـة والاسـتجابة المتغيِّرة عبرَ مجـالِ مستشعرِ التصوير والعرض الإلكتروني. وهذا هو موقعه الإلكتروني الخاص بتصوير الكســوف (www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/eclipse)، ويَسـهُل العثورُ عليه بالاستعانة بمحرّك البحث جوجل عـن طريقِ كتابة Druckmüller eclipse، ويتضمَّن الموقعُ أيضاً صوراً للكسوف تعود إلى عام 1980 أعاد مُعالَجتَها.




60- اللوحاتُ الثلاثُ التي رسَمَها هوارد راسل بتلر للكسوف الكلي للشمس في الأعوام 1918، و1923، و1925، واستندتْ لوحاتُه إلى الملاحظات والمخطَّطات التي دوَّنَها إبَّانَ الكسوف.

لا يكتفي دروكمولر فـي الوقت الحالي بمُعالَجةِ الصور الملتقَطة وَفْقاً لبروتوكول التعرُّض الضوئي الذي يفضِّله، مثل بعض الصور التي التقَطَها أحدُ مؤلِّفَي الكتـاب (جاي باساتشوف، الشكل 51)، وإنما يسافر أيضاً ليَشهدَ الكسوفَ الكلي للشمس بنفسه، وفي أغلب الأحيان يُرافِقُ شادية حبال Shadia Habbal، عالِمةَ الطاقة الشمسية في جامعة هاواي. وتُجرِي ويندي كارلوس Wendy Carlos أيضاً مُعالَجاتٍ مماثلةً لصورٍ متعددة (الشكل 61).

تُظهِر الصورُ المُعالَجة بوضـوحٍ تام أن جزءاً كبيراً من الإكليل الشمسي يتكوَّن مـن تياراتٍ إكليلية، يتحدَّد شكلُها وَفْقاً للمجالِ المغناطيسي للشمس وطريقةِ تفاعُله مع الغازات والبلازما الإكليلية الساخنة. ويختلف مَداها باختلافِ دورةِ النشاط الشمسي (يُمكِنُ تمييزها بسهولةٍ بالعين المُجردة مثل دورةِ البُقَع الشمسية). يتشكَّل أثناء ذُروةِ الدورة الشمسية العديدُ من التيارات في جميع

الاتجاهات، وتكون أشبهَ بأشواك حيوانِ النيص، ويبدو الإكليل بأكمله مُستديراً إلى حدٍّ كبير، أمَّا عندَ الحدِّ الأدنى للنشاط الشمسي فتتكوَّن تياراتٌ استوائية بشكلٍ أساسي، ومن ثَم يصبح الشكلُ العام للإكليل بيضاوياً إلى حدٍّ كبير. وعند الحد الأدنى للنشاط الشمسي، يَكشفُ غيابُ التيارات في القُطبَيْن عن وجودِ أعمدةٍ إكليلية، وهي تياراتٌ محدودةُ النطاق تتألَّف من غازٍ ثابت في مكانه بفعلِ المجال المغناطيسي للشمس. وبمُقارَنةِ التغيُّرات في هذه الأعمدة من مواقعَ مختلفةٍ على امتدادِ المسار الكامل للكسوف الكلي، يُمكِن قياسُ سرعاتِ المادة المتدفِّقة في الأعمدة.

توجد نوافذُ شفَّافةٌ في الغِلاف الجوي للأرض تضمُّ الضوءَ المرئي، وموجاتِ الراديو، وأجزاءً من الأشعة تحت الحمراء. لا تخترقُ الأشعةُ فوق البنفسجية أو الأشعةُ السينية غِلافَنا الجوي لتصلَ إلى الأرض، ولا تصل أيضاً إلى المراصدِ الموجودة فوق القِمَم الجبلية. ولكن منذ أربعينياتِ القرن الماضي، اصطحبتِ الصواريخُ تلسكوباتٍ فوقَ الغِلاف الجوي للأرض لرصْدِ الإشعاع الشمسي في نطاقٍ طيفي ذي طولٍ موجي قصير. وسنناقش هذا النوع من الرصد الشمسي بالتفصيل في الفصل التالي.

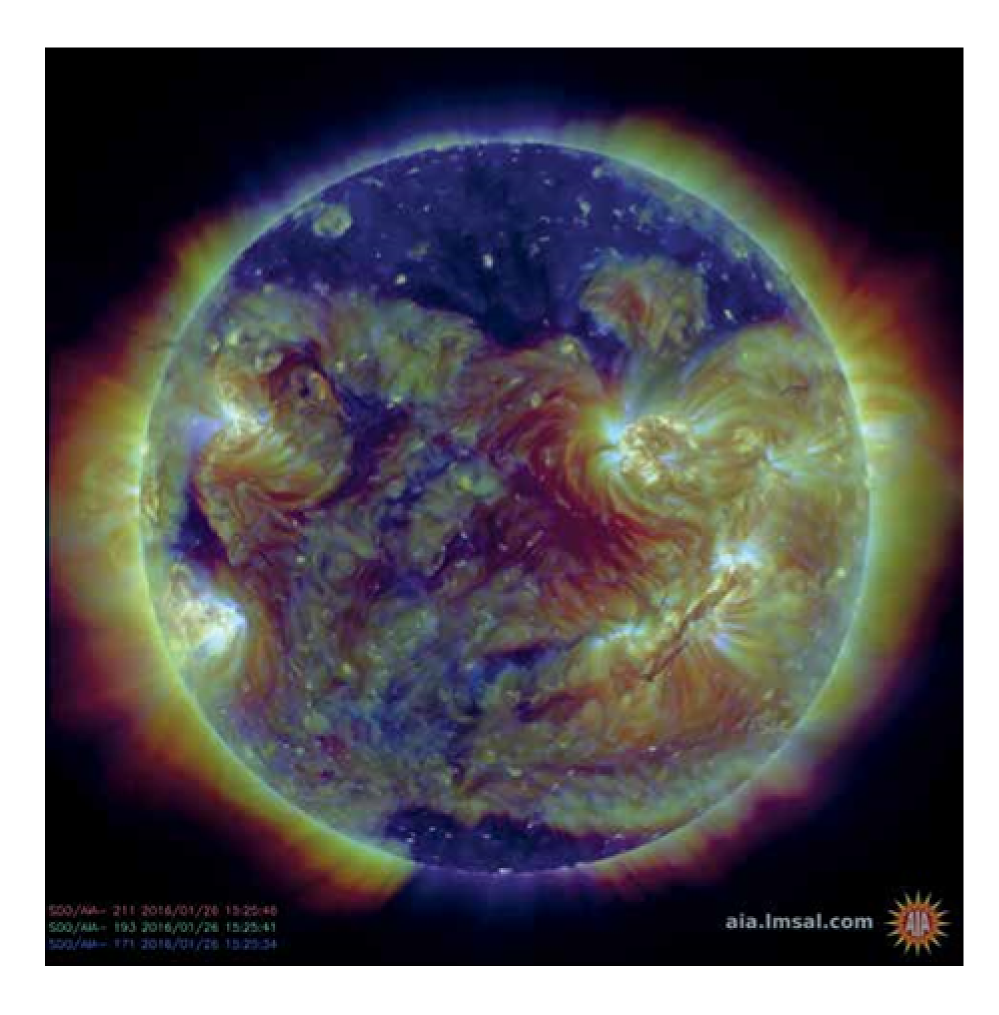


61- صورةٌ مُركَّبة، مكوَّنةٌ من أربع وعشرين صورةً فردية، التقَطتْها ويندي كارلوس، الموسيقيةُ وعالِمةُ الفلك الهاوِية من نيويورك، من صورِ الكسوف الذي شهِدَتْه زامبيا عام 2001. نرى في الصورة إكليلاً نموذجياً لذُروةِ النشاط الشمسي، وهو أقرب إلى الاستدارة وممتلئٌ بالتيارات. تُظهِر الصورةُ المُركَّبة لكارلوس تبايُناً أقلَّ وهي أقربُ إلى المشهد الذي تراه العين، مُقارَنةً بالصور المركَّبة لدروكمولر، المعروضةِ إحداها في الشكل 51.

تصوير الإكليل الشمسي في نطاق موجات الراديو

يُصدِر الغـاز الإكليلـي الساخــن نطاقـاً واسـعاً مـن التــردُّدات الراديوية. ومن الممكِن تحديدُ التفاصيلِ المكانية باستخدامِ مصفوفاتِ تلسكوباتٍ راديوية، مثـل «مصفوفـة جانسـكي البالغة الكِبَر» فــي
نيو مكسيكو التي استخدمها أحدُ مؤلِّفَي الكتاب (جاي باساتشوف) مع زملائه لمحاوَلةِ تحديدِ نقاطِ الاتفاق بين انبعاثِ موجات الراديو والأشعة السينية على حلقاتٍ من الغاز الإكليلي، خلال الكسوف الحلقـي عـام 2012. وتوجـد تلسكوباتُ تصـويرٍ شـمسي مُكرَّسةٌ لهذا الغـرض، ومكوَّنةٌ من عشراتِ التلسكوبات الراديوية الصغيرة المتصلة إلكترونياً، في اليابان، ومؤخراً في مينغانتو في منغوليا الداخلية بالصين.

إن التلسكوبــات الدوليـة الكبيـرة لرسْمِ الخرائـط الراديويــة، والمعروفة باسم «مصفوفة مرصد أتاكاما المليمتري/تحت المليمتري الكبيرة» مُكرَّسةٌ لدراسة الشمس. ونتطلَّع إلى مُعايَنةِ الخرائط الشمسية الناتجة عند الطرف الطويل للأشعةِ تحت الحمراء، والأشعةِ الراديوية القصيرة المدى، في الأوقات المقرَّرة لكِلَيْهما، وكذلك وقتَ كسوف الشمس الذي كان مرئياً من موقعه في تشيلي خلال عامَيْ 2019 و2020.



62- هذه الصورةُ مُلتقَطة من «مجمع التصوير الجوِّي» في مرصد ديناميكا الشمس، وتُظهِر انبعاثَ الأشعة فوق البنفسجية القصوى من الإكليل الشمسي الساخن. دُمِجَت ثلاث صورٍ ذاتِ أطوالٍ موجية مختلفة في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية القصوى، تشير إلى درجات حرارة مختلفة.

الفصل السابع
الإكليل الشمسي غير المرئي:
نقاشٌ يدور في أغلبه حول الفوتونات

لا يمثِّل ما نسمِّيه الضوءَ المرئي إلا جزءاً صغيراً من الأطوالِ الموجية للطيف الكهرومغناطيسي الكلي، الممتد في أحدِ طرفَيْه من موجاتِ الراديو ذاتِ الطول الموجي الكبير جداً إلى أشعةِ غاما ذات الطولِ الموجي الشديد القِصَر في الطرف الآخَر.[19] وكلُّ هذه الموجاتِ أشكالٌ من الموجاتِ الكهرومغناطيسية المنبعِثة من الجُسيمات المشحونة عند تسارُعها، والتي تنتشر عبر الفضاء بسرعةِ الضوء. ويَحجب الغِلافُ الجوي الأرضي العديدَ من الأطوالِ الموجية التي تكون إمَّا أطولَ وإمَّا أقصرَ من الأطوال الموجية للضوء المرئي، ولذلك ظلَّ تصوُّرُنا لما يشمله الفضاءُ الخارجي قاصراً للغاية، حتى بزوغ عصر الفضاء. ولكنْ بمجردِ أن أضحى بمقدورنا وضْعُ مُعداتنا فوق الغِلاف الجوي، استطعنا رؤيةَ الأطوال الموجية غير المرئية، وهي غيرُ مرئيةٍ بسببِ عدمِ وصولها إلى الأرض، وكذلك لأن أجهزةَ الإدراك الحسي لدينا لم تتطوَّرْ بالقدر الذي يُتِيح لنا اكتشافَ ما وراء اللون الأحمر (الأشعة تحت الحمراء)، أو ما وراء اللون البنفسجي (الأشعة فوق البنفسجية). وتكشَّفَ أمامَنا كَوْنٌ مُغايِر تماماً يعجُّ بالظواهر الديناميكية، والتغيُّرات التي كثيراً ما تكون سريعةً ونَشِطة. وتبدَّلَتِ النظرةُ القديمة إلى الكون بوصْفِه شديدَ الهدوء وبطيءَ التطوُّر، وحلَّ محلَّها إدراكٌ بأن هذا الكونَ يتَّسِمُ بالديناميكية والصَّخَب، وأنه حافلٌ بأجرامٍ غريبة وانفجاراتٍ شديدةِ النشاط. وخيرُ برهانٍ على ذلك هو تغيُّرُ نظرتِنا إلى الشمس.

في عام 1879، أيْ بعدَ عَقْدٍ تقريباً من جهودِ ماكسويل التي أثمرتْ توحيدَ الظواهر الكهربية والمغناطيسية معاً، اضطلعَ طالبُ دراساتٍ عليا يُدعى هاينريش هرتز Heinrich Hertz، باقتراحٍ من مُشرِفه هرمان فون هلمهولتز Hermann von Helmholtz، بمهمةِ إيجادِ طريقةٍ لاختبارِ نظريةِ ماكسويل. لم يَقبلْ هرتز خوْضَ هذا التحدي على الفور، ولكن بعدَ مُضِيِّ عدةِ سنواتٍ قرَّرَ تحديدَ ما إذا كان مُمكِناً رصْدُ أيٍّ من الموجات التي تنبَّأَتْ بها النظريةُ. وصنَعَ جهازاً يُنتِجُ موجاتِ راديو عاليةَ الترَدُّد، ونجَحَ في رصْدِها عبر جهازِ استقبالٍ يقع على بُعْدِ عدةِ أمتار. وبعد إجراءِ سلسلةٍ معقَّدة من الاختبارات على خواصِّ هذه الموجات (ويشمل ذلك إثباتَ انعكاسِها

عن سطح معدني) ونشْرِ النتائج، بدا أن هرتز فقَدَ اهتمامَه بموجات الراديو، ويُقال إنه أجابَ بعضَ الطلاب الَّذين سألوه عن أهميةِ الجهود التي بذَلَها، بقوله: «إنها غيرُ مُجْديةٍ على الإطلاق».

وبالرغم من ذلك، رأى فيها آخَرون فرصةً لتطبيقاتٍ مهمة. ومن خلال العمل الجاد والمُثابَرة والتحسينات المستمرة في المُعَدات، تولَّى غوليلمو جيوفاني ماريا ماركوني Guglielmo Giovanni Maria Marconi قيادةَ مجالِ الإبراق اللاسلكي الشديد التنافُسية. بدأ ماركوني تجارِبَه في عام 1894 في حديقتِه الخلفية، وحظِيَتْ جهودُه بقبولٍ رائع في إيطاليا، ووجَدَ جمهوراً يرحِّب بتقنيتِه في إنجلترا، فانتقلَ إلى لندن عامَ 1896. واستطاع بثَّ إشاراتٍ مشفَّرةٍ عبر القناة الإنجليزية بحلول عام 1899، وزعم نجاحَه في استقبالِ إشارةٍ عابرة للمحيط الأطلسي في عام 1901، عبرَ مسافةٍ قَدْرُها 3500 كم. ويُعَد زَعْمُه هذا مَوْضعاً للشك في يومنا هذا؛ لأن البثَّ حدَثَ في وضَحِ النهار، وهو التوقيتُ الأسوأ بحسب ما اتضح، بالإضافة إلى أن الترددَ المختار لم يكُن الأفضلَ. أعَدَّ ماركوني اختباراً أفضلَ في عام 1902 باستخدامِ جهازِ استقبالٍ وُضِع على متن السفينة «إس إس فيلادلفيا»، التي غادرَتِ المملكةَ المتحدة متجهةً غرباً. وتبيَّنَ أن الليلَ هو التوقيتُ الأمثل لأفضلِ عمليات البث؛ إذ قطعتْ مسافةَ 3400 كم. أمَّا في وقت النهار فقد أخفقتْ عملياتُ البث في تجاوُزِ مسافةٍ قَدْرُها 1100 كم.

كانت المشكلةُ في النتيجة المذهلة التي أعلَنَها ماركوني أنه كان من المستحيل تحقيقُها وَفْقَ ما كان معروفاً آنذاك. تنتقل موجاتُ الراديو بطريقةٍ مماثِلة لطريقةِ انتقالِ الضوء، غالباً في مسارٍ مستقيمٍ ما لم يُعترَض مسارُها في موقفٍ ما. وبسببِ انحناءِ الأرض، لم يكُن من المفترَض لإشاراتِ ماركوني أن تتجاوَزَ مسافةً قَدْرُها 200 أو 300 كم على الأكثر، تبعاً لارتفاعِ الهوائي المستخدَم لبث الإشارات. فكيف إذَن يُمكِنُ رصْدُ هذه الموجات بعد تخطِّيها خطَّ الأفق على مثلِ هذه المسافات البعيدة؟ قُدِّمَ حلٌّ من جانِبَي المحيط الأطلسي في الوقتِ ذاته تقريباً، من قِبَل كلٍّ من آرثر كينيلي Arthur Kennelly، مهندسِ الكهرباء الأمريكي، وأوليفر هيفسايد Oliver Heaviside، الفيزيائيِّ البريطاني، اللذَين افترضا وجودَ طبقةٍ موصلة فوق الغِلاف الجوي، تتسبَّبُ في عكسِ موجات الراديو؛ مما يَسْمح لها بالارتدادِ حول انحناءِ الأرض. وفي عام 1912، اقترح الفيزيائيُّ البريطاني وليام إيكلس William Eccles أن التفاوُتَ الكبير بين البث نهاراً وليلاً ربما يُعزَى إلى تغيُّراتٍ في الطبقة الموصلة ناتجةٍ عن الإشعاع الشمسي. (أشار تي إس إليوت T. S. Eliot - في رسالةٍ وفي قصيدة لاحقاً - إلى «طبقة هيفسايد»، وفي المسرحيةِ الغنائية «Cats»، كانت هذه الطبقةُ تقع وراءَ «القمر الهلامي»، ومن ثَم فإنها بعيدة).

كانت طبقةُ كينيلي- هيفسايد، كما سُمِّيت، مَوْضعَ تشكيك، وعُدَّتْ نظريةٌ تتضمَّن حيودَ موجات الراديو أكثرَ ترجيحاً منها. تنبَّأتْ هذه النظريةُ بأن الأطوال الموجية الكبيرة، التي تَحِيدُ بسهولةٍ أكبرَ مُقارَنةً بالأطوال الموجية القصيرة، تكون أكثرَ ملاءَمةً للبث لمسافاتٍ طويلة. وبناءً على ذلك، حجزَت الهيئاتُ الحكومية هذه الأطوال الموجية لنفسها، وأتاحتْ للأعداد الكبيرة المتزايدة من الهُوَاة عاشِقي الراديو تشغيلَ عملياتِ البث في نطاقِ الموجات القصيرة ذات الترددُّات العالية «العديمة الجدوى». ولذلك كان من المذهل أن ينجحَ مشغِّلو الراديو الهُوَاة، في نوفمبر 1922، في إجراءِ أولِ اتصالٍ ثنائي متبادَل عبر المحيط الأطلسي بين نيس في فرنسا، وويست هارتفورد في

ولاية كونيتيكت. ونظراً إلـى أن عملياتِ البثِّ تلك كانت في نطاقِ أطوالٍ موجية قصيرة، بدا واضحاً أنها لم تَنتج عن بثٍّ قريبٍ من السطح، وإنما ارتدَّتْ من أعلى في الغِلاف الجوي، فيما يُسمَّى بالبث «الانزلاقي»، الذي يشبه انزلاقَ الحجرِ فوق سطحِ بركة. وهكذا تجدَّدَ الاهتمامُ بالطبقةِ الموصلة في الغِلاف الجوي.

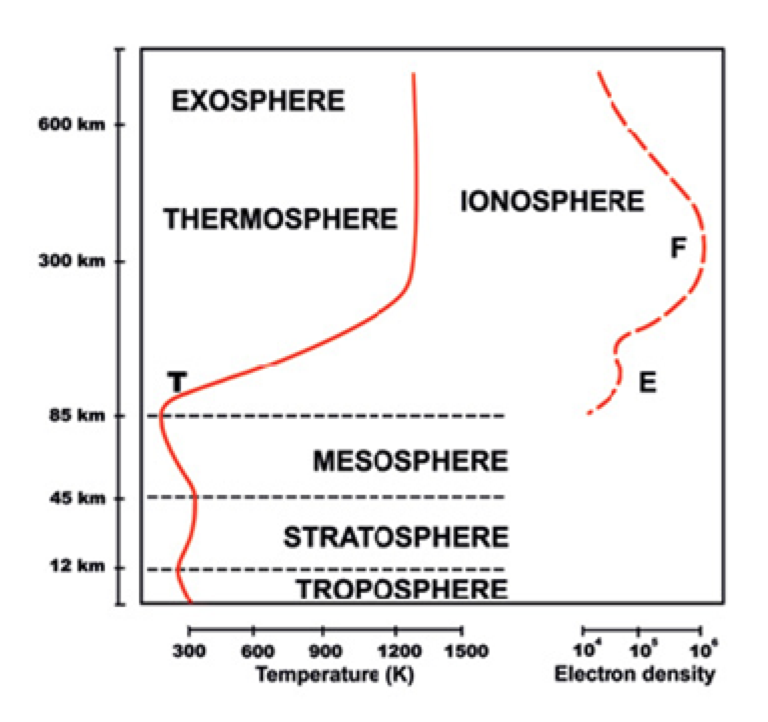
الغِلاف الأيوني (الأيونوسفير)

في كامبردج بالمملكة المتحدة، قرَّرَ إدوارد أبلتون Edward Appleton استكشافَ خواصِّ الطبقةِ العاكسة الافتراضية باستخدامِ إشارةٍ بثَّتْها هيئة الإذاعة البريطانية من لندن، ودرسَ كيفيةَ اختلافِ قوةِ الإشارة على مدار اليوم ليلاً ونهاراً. تكوَّنتِ الإشارةُ التي استقبلها في كامبردج من شعاعٍ مباشِرٍ وحُزْمةٍ منعكسة، تَداخَلا معاً نظراً إلى أنهما قطَعَا مساراتٍ طويلةً مختلفة للوصول إلى مُستقبِل الإشارات (يَحدثُ التأثيرُ ذاته في الضوء المرئي، وتَنتج عنه أنماطُ تداخُلٍ، مثل تكوُّن «حلقات نيوتن»). وفي ليلة 12 ديسمبر عام 1924، خَلصَ أبلتون إلى أنَّ الطبقة التي أشار إليها بالرمز E، للدلالة على «الناقل الكهربـي»، كانت على ارتفاع 100 كم تقريباً. وبمُواصَلَةِ تجارِبه، تبيَّنَ له وجودُ طبقةٍ أخرى فوق الطبقة E، وأشار إليها بالطبقةِ F. وفي فترة لاحقة، اكتشَفَ طبقةً أخرى أقربَ إلى الأرض توجد من حينٍ لآخَر، وتقع على ارتفاع 60 كم تقريباً، واختار تسميتَها بالطبقة D، بدلاً من إعادةِ تسميةِ الطبقات بـ A وB وC وما إلى ذلك؛ لأنه يَجهل عددَ الطبقات الأخرى التي قد يَجِدها.

في الوقت ذاته تقريباً في واشنطن العاصمة، كان غريغوري بريت Gregory Breit وطالِبُه مرلـي توف Merle Tuve، يعملان باستخدامِ مُعَداتِ بثٍّ مُطوَّرة في مختبرِ الأبحاث البحرية المجاوِر، مستخدِمَيْن تقنيةً تُسمَّى «ارتفـاع النبضات»، ولا تحدِّد هـذه التقنيةُ وجودَ طبقةٍ موصلة فقط، وإنما تحدِّد ارتفاعهـا أيضاً. وجوهرُ هـذه الطريقةِ هو إرسالُ نبضةٍ قصيرة، لكنها مُكثَّفة، من موجـات الراديـو، ثم يُقاس الزمن اللازم لاستقبال الموجة المنعكسة. وتُعَد طريقةُ النبض هذه أساساً للتقنية المعروفة الآن باسمِ «الرادار»، RADAR، وهي اختصارُ عبارة RAdio Detection And Ranging، وتعني الكشفَ عن موجاتِ الراديو وتحديدَ مَداها. وفي نهاية المطاف، اقترح الفيزيائيُّ الإسكتلندي روبرت واتسون- وات Robert Watson- Watt، الذي ترأَّسَ جهودَ تطويرِ الرادار في المملكة المتحدة، تسميةَ الطبقةِ الموصلة «الأيونوسفير»، قياساً على مُصطلَحَي «الستراتوسفير»، و«التروبوسفير»، وأصبحتْ هذه التسميةُ المُعترف بها (الشكل 63).

يُشارِك مختبرُ الأبحاث البحرية منذ فترةٍ طويلة في تطويرِ مُعَداتِ الراديو والرادار العسكرية، وفـي دراسـةِ تأثيراتِ الغِلاف الأيوني على الاتصالات. وفـي أوائـل عشرينيات القرن العشرين، اقترَحَ إدوارد هولبرت Edward Hulburt، من مختبرِ الأبحاث البحرية، أن الأشعةَ فوق البنفسجية القصوى المنبعثةَ من الشمس تُنتِجُ طبقةً من الغِلاف الأيوني، تُمتَصُّ فوق الغِلاف الجوي. لذا في عام 1945، كان من الطبيعي توجيهُ الدعوة إلى إرنست كراوس Ernst

Krause، من مختبر الأبحاث البحرية، للانضمام إلى فريقٍ مُرسَلٍ إلى ألمانيا لاستيفاءِ معلومـاتٍ مـن علمـاء الصواريخ الألمانيين، وذلك إدراكاً لأهميةِ التقنيات الصاروخية التـي استخدموها فـي إجراءِ نوعيةِ أبحاثِ الغِلاف الجوي العلـوي التي أراد مختبرُ الأبحاث البحرية إجراءَها. وفي شهر ديسمبر من العام نفسه، أنشؤوا «فرع أبحاث مسبار الرصد الصاروخي»، وبعدَ مُضِيّ شهرٍ واحد، وجَّهَ قسمُ الذخائر العسكرية دعوةً إلـى مختبرِ الأبحاث البحرية، ومجموعةِ العلماء الممولين من البحرية، لبدْءِ بَرْنامجٍ بحثي باستخدامِ صواريخ السَّبْر.

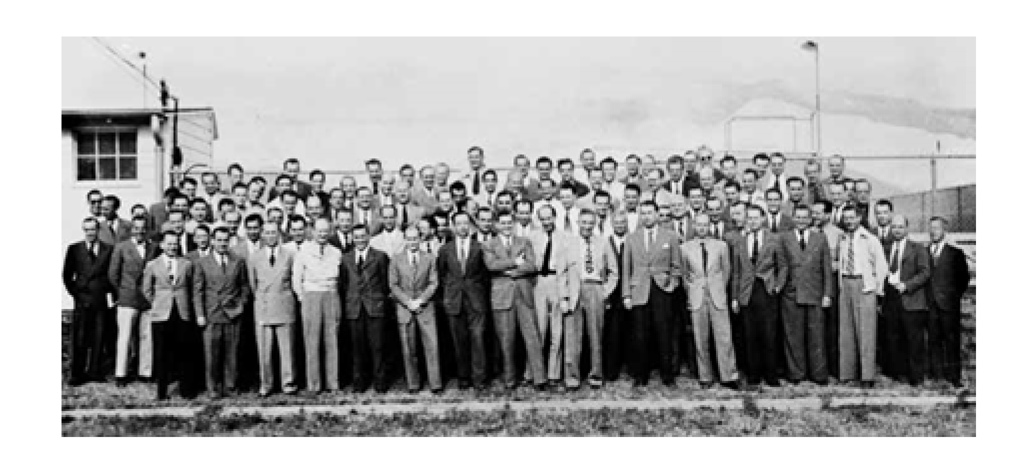


63- يتشكَّل الغِلافُ الأيوني عالياً في الغِلافِ الجوي، غالباً في الغِلاف الحراري، لكنه يمتدُّ أيضاً إلى الأسفل وصولاً إلى الغِلاف الأوسط، وإلى الأعلى وصولاً إلى الغِلاف الخارجي. ويبيِّن التمثيل البياني الماثل جهة اليمين بوضوحٍ الكثافةَ العددية النموذجية للإلكترونات الحُرَّة في الأجزاء المختلفة من الغِلاف الأيوني. تتفاوتُ الأرقامُ تفاوتاً كبيراً بين الليل والنهار، وكذلك اعتماداً على مستوى النشاط الشمسي.

يُعَد الاسمُ صموئيل كليمنس Samuel Clemens أحدَ أشهرِ الأسماء المستعارة في الأدب الأمريكي، وقد استعاره صاحِبُه (مارك توين) من قبطانٍ مُتوفًّى لأحدِ قواربِ نهر المسيسيبي (وعن هذا قال: «لقد استَلَبْتُه دونَ طلبِ الإذن من رُفاتِ صاحِبِه»)، واستخدم ذلك الاسمَ في تغطيةِ أخبارِ النهر لصحيفة «نيو أورليانز تايمز- بيكايون» New Orleans Times- Picayune. من أجل التأكُّد من أن المياهَ عميقةٌ بما يكفي لعبورِ السُّفُن عبوراً آمِناً، يتولَّى أحدُ أفرادِ الطاقم، ويُدعى «السابر»، قذْفَ حبلٍ معقودٍ في نهايته ثِقَلٌ من الرصاص إلى جانب السفينة. وعندما يتجاوزُ عُمقُ الماء العُقْدتَيْن - 12 قدماً أو 3.65 متر - يصيح مُشيراً بعلامةِ النصر، قائلاً «قامتان وفقاً للعلامة»، أو ببساطةٍ «قامتان بالعلامة» (مارك توين).

في بعض الأحيان، يُفرَغ الثِّقَلُ المصنوع من الرصاص من الأسفل لجمْعِ عيناتٍ من مادةِ قاعِ النهر، لتحديدِ وقْتِ تحوُّلِها من الطين الآمِن إلى الصخورِ الخَطِرة. كانت عمليةُ أَخْذِ العينات هذه، ولم تزل، تُعرَف باسم «إجراء عملية السَّبْر». وتُستخدَم الكلمةُ الفرنسية sondage (مُشتقَّة من كلمة sonder وتعني التقصِّي) للتعبيرِ عن عمليةِ أَخْذِ العينة، واستُخدِمَت حديثاً للتعبير عن استطلاعٍ للرأي، وكانت قديماً تصِفُ خندقاً يَحفره علماءُ الآثار لفحْصِ طبقاتِ الأرض في موقعِ الحَفْر. وفي أوائل القرن العشرين، استُخدِمت هذه الكلمةُ للإشارة إلى المُعَدات، المعروفة باسم أجهزةِ السَّبْر اللاسلكي، التي تُرسَل لأعلى على متنِ منطادِ الطقس لأخذِ عيِّناتٍ من الغلاف الجوي، وإعادةِ إرسالِ البيانات إلى الأرض. عندما بدأ إرسالُ صواريخَ صغيرةٍ في مَهمَّاتٍ قصيرة لقياس الأحوال الجوية أعلى الغِلاف الجوي، ثم إرسالها إلى أبعدَ من ذلك وصولاً إلى الغِلاف الأيوني، بل وأبعد من ذلك أيضاً وصولاً إلى الارتفاعات التي ستصل إليها الأقمارُ الاصطناعية المدارية لاحقاً، أُطلِق عليها اسم «صواريخ السَّبْر» sounding rockets؛ لأن الغرَضَ منها إجراءُ القياسات على ارتفاعاتٍ عالية.

بعد نهاية الحرب العالمية الثانية، جُمِعت أجزاءُ الصواريخ في- 2 2 -V المستولى عليها، داخلَ المئاتِ من عَرَبات القطار وشُحِنت إلى المنشأة العسكرية «وايت ساندز ميسايل رينج» White Sands Missile Range في نيومكسيكو، وإلى القاعدة العسكرية القريبة «فورت بليس»، برفقةِ مجموعةٍ كبيرة من علماء ومهندسي الصواريخ الألمانيين (الشكل 64). وفي أواخرِ أربعينيات القرن الماضي وحتى أوائل خمسينياته، أُطلِق من مُنشأةِ وايت ساندز العشراتُ من صواريخ فاو- 2، وفي الوقت نفسه نُفِّذ بَرْنامجٌ لتطويرِ صواريخ أيروبي Aerobee الأمريكية الصُّنْع. وفي كلتا الحالتَيْن، استُخدِمت الصواريخ بالأساس في دراسات الغِلاف الجوي العلوي والشمس، مع إجراءِ تحسيناتٍ تدريجية، مثل أنظمةِ استردادِ المظلات والتوجيه الشمسي، بالإضافة إلى زيادةِ حجمِ حُمولةِ سلسلةِ صواريخ أيروبي.[20]



64- مجموعةٌ تضمُّ أكثرَ من 100 فرد، أغلبُهم علماءُ ومهندسو صواريخ ألمانيون، في قاعدة «فورت بليس» في تكساس عام 1946، وهم جزءٌ من عملية «مشبك الورق» Paperclip. يقف فيرنر فون براون Wernher von Braun في الصف الأول، وترتيبُه السابعُ من اليمين. وفي عام 1950، انتقل هو وفريقُه إلى هنتسفيل في ألاباما، وهناك طوَّرَ الصاروخَ ريدستون Redstone وصواريخَ أخرى.

هناك العديدُ من بَرامج صواريخِ السَّبْر الصغيرة في جميعِ أنحاء العالَم، في أوروبا وآسيا وأستراليا وغيرها. وأكبرُ هذه البرامج يوجد في الولايات المتحدة، إذ يوجدُ الموقعُ الرئيس لإطلاقِ صواريخِ السَّبْر التابعة لوكالة ناسا، وهو مُنْشأة وايت ساندز العسكرية، وتُجرَى بعضُ عملياتِ الإطلاق في جزيرة والوبس بفيرجينيا، وفي بوكر فلات بألاسكا. تقدِّمُ صواريخُ السَّبْر مزايا محدَّدة تجعلها متفوِّقةً على الأقمار الاصطناعية، منها أنها أقلُّ تكلفةً بكثير في بِنائها وإطلاقها، وعادةً ما يكون الوقتُ المستغرَق منذ بدء البرنامج وحتى وقت الإطلاق أقصرَ، وهناك المزيدُ من الفُرَص لإطلاقِ صواريخِ السَّبْر (ويرجع ذلك أساساً إلى التكلفة المنخفضة)، ويوفر البرنامجُ سبيلاً لاختبارِ أدواتٍ جديدة وتدريبِ صِغارِ العلماء والمهندسين. أمَّا الجانبُ السلبي فيشمل الآتي: يتضمَّن الإطلاقُ مُحرِّكاً صاروخياً يعمل بالوقود الصلب ويُحقِّق تسارُعاً مُخِيفاً (تتجاوز سرعةُ الصاروخ سرعةَ الصوتِ في غضونِ أربعِ ثوانٍ!)، وأحمالاً اهتزازيةً هائلة. بالإضافة إلى ذلك، فبدلاً من شهورٍ وسنواتِ المراقبة التي يوفِّرها القمرُ الاصطناعي المداري، فإن الوقتَ الذي تستغرقه رحلةُ صاروخِ السَّبْر لا يتجاوز عادةً خمسَ دقائق تقريباً. إلا أنَّ مُحصِّلةَ هذه العملية أكبرُ من الصفر بكثير، ولهذا لم تزل وسيلةً مُفضّلَة بشدةٍ لإجراء البحوث. إن توافُرَ المُشاهَدات الصاروخية له صلةٌ خاصة بالفيزياء الشمسية؛ لأنه من الأفضل دراسةُ الإكليلِ الشمسي ونشاطِه فوق غِلافنا الجوي عند أطوال موجية تتجاوز نطاقَ الضوء المرئي بكثير. وفي 24 فبراير عام 1949، أطلقتْ مُنشأةُ وايت ساندز صاروخاً وصل إلى ارتفاعٍ قياسي مِقدارُه 250 كم. ليصبح أولَ جسمٍ معروف من صُنْع الإنسان يصل إلى الفضاء الخارجي.

الأشعة السينية الشمسية

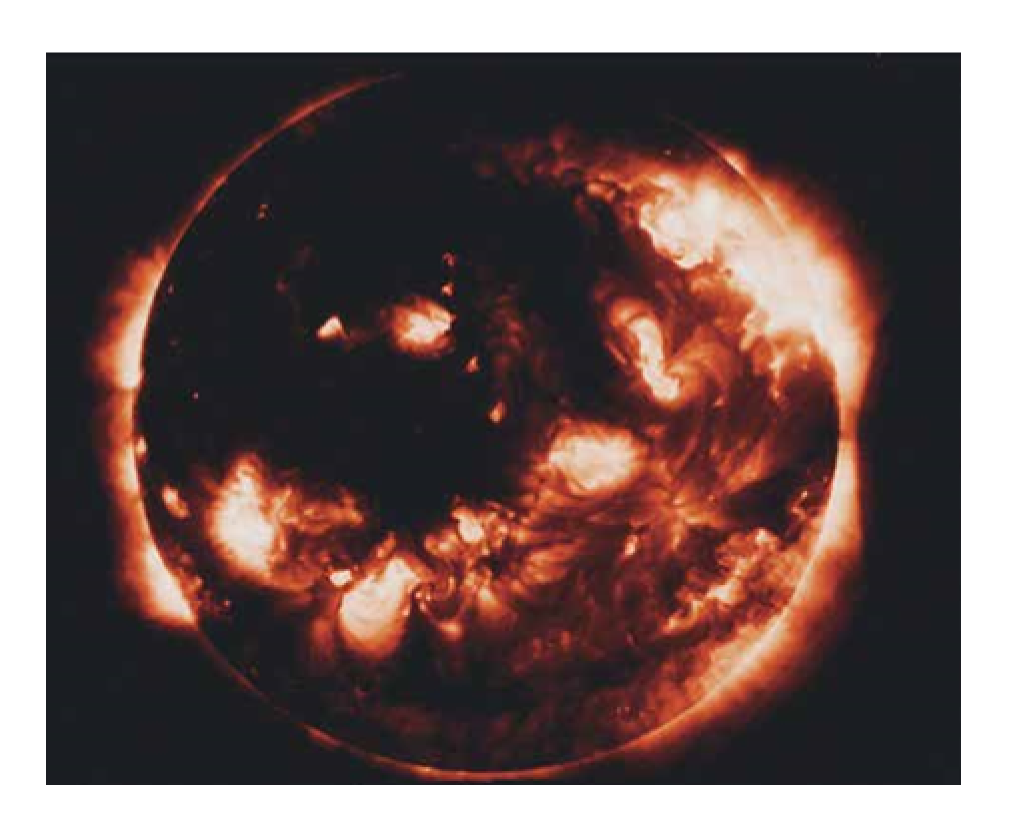
استمرَّ لغزُ وجودِ الإكليل الشمسي بوصفه أحدَ أعظمِ الألغاز المستعصية على الحل في تاريخ الفيزياء الفلكية لِمَا يُقارِب ثمانين عاماً، منذ التطبيقاتِ الأولى للتحليل الطيفي للإكليل الشمسي وقتَ الكسوف في عام 1860 وحتى عام 1941، عندما أجرى الفيزيائيُّ السويدي العظيم هانز ألفين مُراجَعةً للأدلةِ المتاحة، وتوصَّلَ إلى أن الإكليلَ الشمسي شديدُ الحرارة. المشكلة هي أن الإكليلَ الشمسي بدا مستحيلاً من الناحية الفيزيائية. فقد رُصِد أنَّ له طيفاً شبيهاً إلى حدٍّ كبير بسطحِ الغِلاف الضوئي للشمس، الذي تبلغ درجةُ حرارته 5800 كلفن. وهذا كيان ساخن بكل تأكيد، لكنه ليس ساخناً بالقدر الكافي بحيث يُتِيح للإكليل التوسُّع إلى هذا الحد البعيد الذي نراه. يتحدَّد مَدى الغِلاف الجوي بالتوازُنِ بين درجةِ حرارته التي تدفعه إلى التمدُّد نحوَ الخارج، وقوةِ الجاذبية التي تَسْحبه إلى الداخل مرةً أخرى. والغِلافُ الجوي الذي تبلغ درجةُ حرارته 5800 كلفن ويقعُ تحتَ تأثيرِ جاذبيةِ الشمس القوية، لن يمتدَّد إلا لجزءٍ بسيط من نصفِ قُطْر الشمس، وليس إلى هذا الحد البعيد المرصود بالفعل. لذا، كان تفسيرُ المدى «المستحيل» للإكليل المنظور لغزاً كبيراً.

علاوةً على ذلك، كما رأينا في الفصل السادس، رُصِدت خطوطٌ طيفية ساطعة في الإكليل الشمسي، تنبعثُ عند أطوالٍ موجية محددة، ولم يكن التعرُّف على أيٍّ منها ممكناً. وبدَتْ هذه الخطوطُ غيرَ متوافِقةٍ مع أي عناصر معروفة! واقتُرِحت حلول كثيرة؛ منها أن هذه الخطوطَ تخصُّ عنصراً جديداً وهو الكورونيوم (قياساً على عنصر الهيليوم المكتشَف حديثاً، والذي جرى التعرُّف عليه للمرة الأولى في الطيف الشمسي). ولكن لم يفلحْ أيٌّ من هذه الحلول. وأخيراً، توصَّلْنا إلى الإجابة، بفضلِ مجموعةٍ من الدراسات المختبرية حول التحليلِ الطيفي للبلازما العالية الحرارة، بالترافُق مع الحسابات التفصيلية للفيزياء الذرية، وعملياتِ رصدِ بعض النجوم الغريبة المتغيِّرة. وتبيَّن أن خطوطَ الانبعاث الغريبة تلك ناتجةٌ عن حالاتٍ شاذَّةٍ لعناصرَ عاديةٍ معروفة (مثل الحديد والكالسيوم)، لكن مع نزْعِ الكثير من الإلكترونات بسببِ درجاتِ الحرارة الشديدة الارتفاع. وتؤدي التصادُماتُ بين ذراتِ الغاز الإكليلي الساخن إلى نزْعِ الإلكترونات من ذراتها المتعادلة، وكلما ارتفعتْ درجةُ الحرارة زادتْ حدةُ الاصطدامات، وزادَ عددُ الإلكترونات المنتزعة المُحَرَّرة بسببِ التصادمات. وفي النهاية، تتَّحِدُ هذه الإلكترونات الحُرَّة من جديدٍ مع أيوناتها وتنبعثُ فوتوناتٌ نتيجةَ هذه العملية. ثم تتحرَّر إلكتروناتٌ أخرى من ذراتٍ أخرى في دورةٍ مستمرة من التأيُّن وإعادةِ الاتِّحاد.

هذه الحالاتُ الشاذة للمادة الشديدة التأيُّن (أيْ المنزوعة الإلكترونات)، بالاقتران مع أدلةٍ طيفية أخرى أدقَّ (مثل اتِّساع الخطوط الطيفية المرصودة)، تشيرُ معاً إلى أن درجةَ حرارةِ الغاز الإكليلي شديدةُ الارتفاع، في حدودِ مليون كلفن. وتبيَّنَ أن الطيفَ الشبيهَ بطيفِ الغِلاف الضوئي البالغة حرارته 5800 كلفن، والمرصود في الإكليل وقتَ كسوف الشمس، يُعزَى إلى الضوءِ الشديدِ السطوع للغِلاف الضوئي الناشئ عن تلك الإلكتروناتِ الموجودة في الإكليل، ممَّا يوفِّر خلفيةً ضوئية قوية عند أطوالٍ موجيةٍ قريبة من خطوطِ الانبعاث، مع طمْسِ خطوطِ امتصاصِ فراونهوفر بسببِ إزاحةِ دوبلر نتيجةً للحركاتِ السريعة للإلكترونات؛ ممَّا يجعل الإكليل يبدو، على نحوٍ مضلِّل، وكأنَّ له درجةَ حرارةِ الغِلاف الضوئي نفسها.

ويكون الإكليلُ شديدَ الحرارة لدرجة أنّ انبعاثَه الأساسـي، أيْ جُلَّ الضوءِ المنبعث منه، يكونُ في نطاقِ أطوالٍ موجية فائقة الصِغر، وتحديداً في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية القصوى والأشعة السينية الضعيفة من الطيف الكهرومغناطيسي. لقد حصلنا على أولِ صورةٍ للأشعة السينية الشمسية من المناطق الساطعة والحارَّة والنَّشِطة في الإكليل في عام 1960، من خلالِ تجربةِ صاروخِ السَّبْر التي أجراها هربرت فريدمان Herbert Friedman من مختبرِ الأبحاث البحرية. كان جهازُ التصوير عبارة عن كاميرا بدائية تماماً ذات ثقب، لكن تقنياتِ تركيزِ الأشعة السينية لتكوينِ صورةٍ تطوَّرتْ سريعاً على مدارِ العقود التالية، إذ تصدرت مُعَداتِ السَّبْر الصاروخية المشهد. ونرى مثالاً على الجودةِ العالية للبيانات التي يُمكِن الحصولُ عليها الآن باستخدامِ صواريخِ السَّبْر في الشكل 65. التُقِطتْ هذه الصورة في 11 يوليو 1991، في وقتٍ يُوافِقُ حدوثَ كسوفٍ كلي للشمس رُصِد من مكانٍ آخَر. ومن حُسْنِ المُصادَفة أنْ رُصِدَ كسوفٌ كلي مُباشَرةً فوقَ تلسكوب «كندا- فرنسا- هاواي» فـي هاواي، في لحظةِ اقترابِ القمر من الشمس بالضبط، فوقَ مدى الصاروخ في وايت ساندز في نيو مكسيكو. وأمكَنَ التقاطُ هذه الصورة باستخدامِ طلاءٍ خاص جرى تَرْسيبُه على مرايا «تلسكوب الأشعة السينية للطيف العادي» (نيكست، Nixt) لجعْلِها عاكسةً عند أطوالِ موجاتِ الأشعة السينية الضعيفة. وأتاح ذلك التقاطَ صورةٍ للإكليل الشمسي المرتفع الحرارة، وأتاح في الوقت ذاته رؤية قُرصِ القمر المظلِم وهو يقتربُ ويَحجبُ جزءاً من الإكليل الممتد.

بعـد مُضِـيّ 21 عامـاً بالضبـط، وفـي 11 يوليـو 2012، تحقَّـقَ رصْدٌ صاروخي آخَرُ أكثرُ إبهاراً باستخدامِ نوعِ الطلاء العاكس ذاته، بواسطة «المصور الإكليلي العالي الدقة» (Hi- C). يَعرضُ الشكلُ 66 مُقارَنةً بيـن الصورةِ الملتقَطة فـي نطاقِ الأشعة فـوق البنفسجية القصوى للإكليل عند 19.5 نانومتر بالدقة المكانية للصورة الملتقَطة بالتلسكوب نيكست، باستخدامِ مرصـد ديناميكـا الشمـس التابـع لوكالة ناسا، والصورةِ الصاروخية المتزامِنة الملتقَطة بالمصوِّر الإكليلي العالـي الدقة، بدقةٍ أعلـى نحوَ خمسِ مـرات.

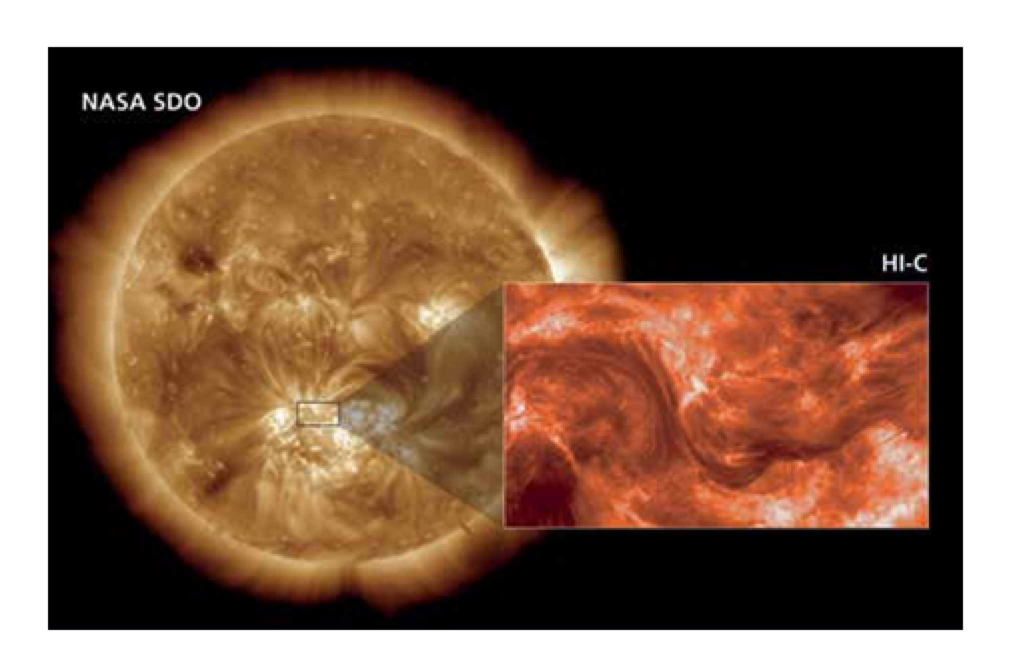


65- تَعرض هذه اللقطةُ صورةً عالية الدقة للإكليل الشمسي في نطاقِ الأشعة السينية الضعيفة، التقَطَها صاروخُ السَّبْر «نيكست» في 11 يوليو 1991. يُمكِن رؤيةُ هلالِ التعتيم من القمر في أقصى اليمين، وفي هذه اللحظة بالضبط شُوهِد كسوفٌ كلي فوقَ هاواي.

وتشكِّل هذه البيانات مكوِّناً أساسياً في أبحاث الطاقة الشمسية، بالإضافة إلى البيانات المستخلَصة باستخدامِ أنواعِ جديدة من أجهزةِ القياس الطيفي ومن أجهزةِ التصوير في نطاقاتِ أطوالٍ موجية أخرى تمتدُّ منَ الأشعة فوق البنفسجية وحتى الأشعة السينية القوية. ونظراً إلى أن بَرْنامجَ صاروخِ السَّبْر يوفِّر وسيلةً سريعة ومنخفضةَ التكلفة نسبياً لإطلاقِ إحدى المُعَدات في الفضاء، فإنه يُعَد جزءاً حيوياً من جهودنا لفَهْم الشمس؛ ومن ثَم، فهم جميع جوانب الفيزياء الفلكية المعنية برصدِ البلازما الممغنطة الساخنة.

الأقمار الاصطناعية

شهِدَ الرابع من أكتوبر عام 1957 حدَثاً تاريخياً عندما أطلَقَ الاتحادُ السوفييتي أولَ قمرٍ اصطناعي في العالَم، «سبوتنيك 1» Sputnik I، وهو ما أذِنَ ببدايةِ عصر الفضاء، وانطلاقِ السباق الفضائي بين الولايات المتحدة والاتحاد السوفييتي. أطلَقَ الفريقُ السوفييتي، بقيادةِ سيرجي كوروليف Sergei Korolev، الذي ظلَّ اسمُه سراً آنذاك، كرةً معدنية مصقولةً تَزِن 83 كجم.



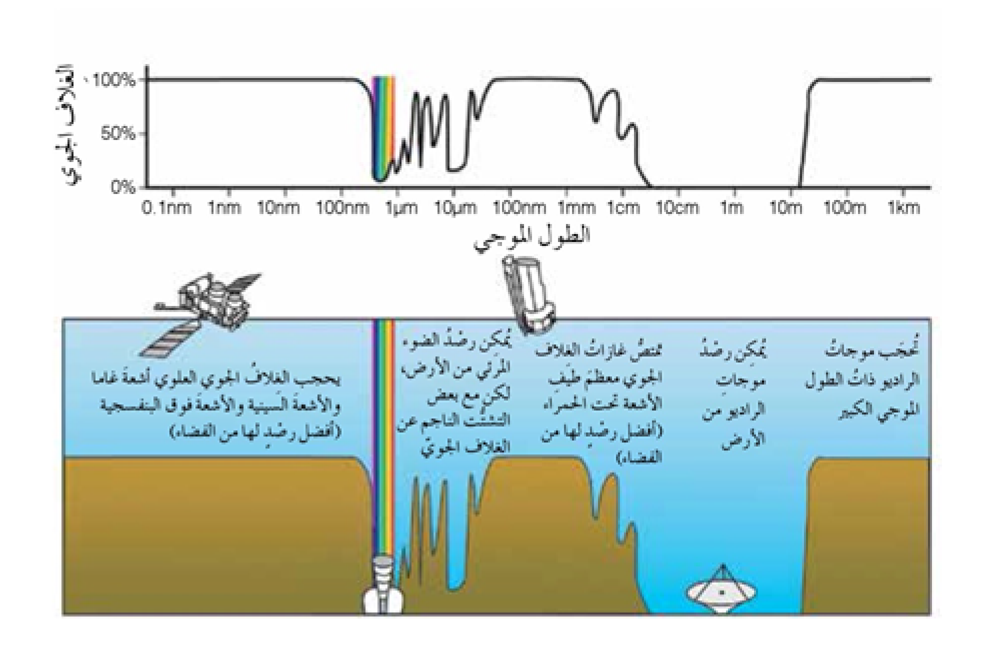
66- لقطةٌ التقَطَها صاروخُ السَّبْر المُسمى «المصور الإكليلي العالي الدقة»، تُقارِنُ بين التفاصيلِ المرصودة بواسطة المصور الإكليلي، ذات الدقة المحسنة، وتلك الملتقَطةِ في مرصد ديناميكا الشمس التابعِ لوكالة ناسا. التُقِطت الصورتان عند طولٍ موجي واحد وفي التوقيت ذاته.

وكانت تُرى من الأرض بالعين المجرَّدة قُربَ شروقِ الشمس وغروبها في أثناءِ مرورها عالياً، وتنبعث منها إشاراتُ بثٍّ راديوية مستمرة يُمكِن للهُوَاة من مُستقبِلي إشاراتِ الراديو رصْدُها.

وكانت الولايات المتحدة تعملُ منذ عدةِ سنواتٍ على إطلاقِ قمرٍ اصطناعي إلـى مدار الأرض، عبْرَ بَرْنامجِ فانغارد Vanguard التابع للبحرية الأمريكية. حاوَلَ بَرْنامجُ فانغارد إطلاقَ حمولةٍ تزن 1.6 كجم، إلا أن عملية الإطلاق، المذاعة عبرَ البث التليفزيوني المباشِر، انفجرتْ على نحوٍ مُؤسِف بعد ثوانٍ فقط من تشغيلها. وبعد ذلك التاريخ بشهرٍ واحد تحقَّقَ سبْقٌ أكثرُ إثارةً عندما أُطلِق القمرُ الاصطناعي ذو الحمولـة الأثقل «سبوتنيك 2» وعلى مَتْنه كلبةٌ تُدعى لايكا.

وتسبَّبَ إطلاقُ سبوتنيك فـي حالةٍ أشبهَ بالذُّعْر فـي الولايات المتحدة، ونتَجَت عنه جهودٌ حثيثة لإطلاقِ قمرٍ اصطناعي، ووُضِع البَرْنامج تحت قيادة فيرنر فون براون، صاحبِ تصميم الصاروخ «جوبيتر- سـي» Jupiter- C. وفـي 31 يناير عـام 1958، أطلِق القمرُ الاصطناعي «إكسبلورر 1» Explorer I، وبعد ذلك استمرَّ البَرْنامجُ في إطلاقِ سلسلةٍ من الأقمار الاصطناعية الخفيفة الوزن، ذات النَّفْع العِلْمي. ومن بين الإنجازات الأخرى، كشفت هذه التجارِبُ - وسلسلةُ تجارِبَ مُماثِلة في الاتحاد السوفييتي - عن أحزمةَ فان آلن Van Allen الإشعاعية حول الأرض، وهي مناطقُ على شكلِ حلقاتٍ تتألَّفُ من جُسيماتٍ مشحونةٍ ذات طاقةٍ عالية يُبقِيها المجالُ المغناطيسي للأرض في موضعها. وفي 1 أكتوبر 1958، أُنشِئتِ الإدارةُ الوطنية للمِلاحـة الجويـة والفضـاء (ناسـا)، وشهِدَ تمويلُ التعليم زيادةً كبيرة، خاصـةً في مَجالَي الرياضيات والعلوم.

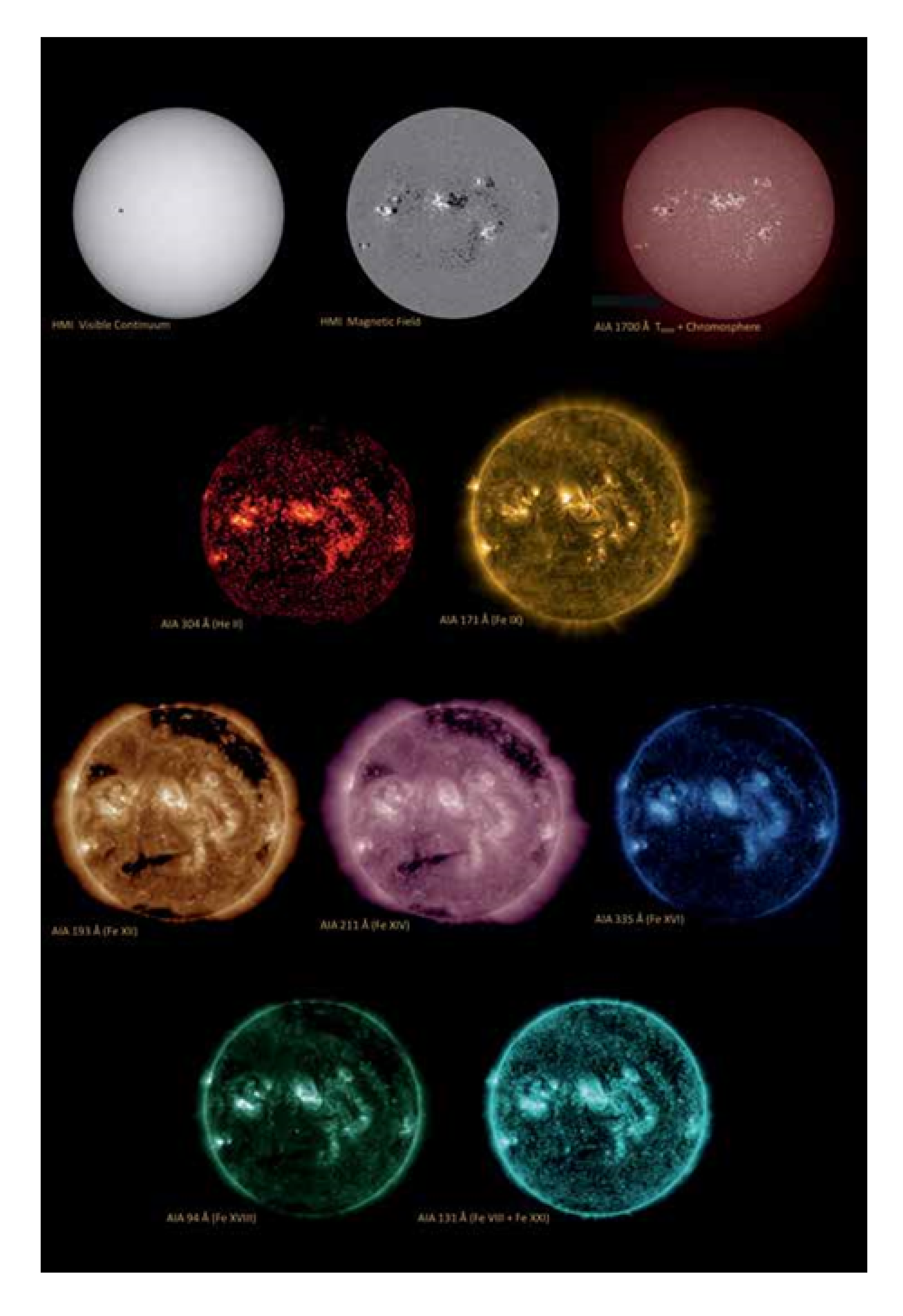
عادتْ كلُّ هذه الجهودِ المبذولة بنفْعٍ عظيم على البحث العلمي، لا سيما عبرَ وكالةِ ناسا المدنية. وبدأ بَرْنامجٌ قوي لإطلاقِ أقمارٍ اصطناعية صغيرة، ليس حـول الأرض فقط، وإنما شملَ زيارةَ القمرِ وكوكـبِ الزُّهَرة فـي الستينيات. وأفـادتْ هـذه البرامجُ دراسـاتِ الجُسيماتِ الشمسية العالية الطاقة المعروفـة باسم الأشـعة الكونية، والجزيئاتِ المنخفضة الطاقة المعروفة باسم الرياح الشمسية، وأُطلِقت سلسلةٌ من ثمانيةِ أقمارٍ اصطناعية صغيرة سُمِّيت «المرصد الشمسي المداري» Orbiting Solar Observatory، بيـن عامَيْ 1962 و1971، اسـتهدفتْ دراسةَ الشمس فـي الأطوال الموجية للأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية.[21]



67- الغِلافُ الجوي للأرض غير مُنفِذٍ لمعظمِ الأطوال الموجية الكهرومغناطيسية خارجَ نطاق الضوء المرئي وجزء من الطيف الراديوي. وتوجد بعضُ النوافذ الضيّقة لنقْلِ الأطوال الموجية المرئية والأشعة تحت الحمراء وموجات الراديو عبرَ غِلافنا الجوي إلى الأرض.

وبعد إنهاءِ بَرْنامج «أبولو» Apollo الهادِفِ للهبوط على سطح القمر، استُخدِم الصاروخُ المتبقـي، «سـاتورن 5» Saturn V، لإطلاقِ محطةِ «سكاي لاب» Skylab، وهي أول محطةِ فضاءٍ أمريكية، أعقَبَتها ثلاثُ فتراتٍ زمنية منفصلة انطلقتْ خلالَها زياراتٌ لروَّادِ الفضاء على متنِ الصاروخ «ساتورن 1ب» Saturn 1B. وبدلاً من وحدةِ أبولو القمرية، جرى تثبيتُ مجموعةٍ من التلسكوبات الشمسية، تُسمى «تلسكوب أبولو المُثَبَّت» Apollo Telescope Mount، أدارها روَّادُ فضاء محطة «سكاي لاب»، الذين استعادوا أسطواناتِ الأفلام الكبيرة وأعادوها إلى العلماء المنتظرين على الأرض. (يُعرَض «تلسكوب أبولو المُثَبَّت» حالياً للجمهور في المتحف الوطني للطيران والفضاء التابع لمعهد سميثسونيان في واشنطن العاصمة).

لا تُشكِّل الأطوالُ الموجية للطيف الكهرومغناطيسي، التي نسمِّيها الضوء المرئي، إلا شريحةً صغيرة جداً من الطيف، كما هو موضَّح في الشكل 67. يوضِّح قوسُ قُزَحٍ الرأسي فـي هذا الرسم موقعَ الألوان المرئية، فـي حـين توجدُ الأطوالُ الموجية الأقصـر للموجات فوق البنفسجية جهةَ اليسار، والأطوالُ الموجية لموجات الراديو الأطول جهةَ اليمين. ويشير الخطُّ الأسود المتعرِّجُ الظاهر في الشكل إلى مقدارِ عتامة الغِلاف الجوي الأرضي لكل طولٍ موجي، وتعني «عدمُ النفاذية» المقدارَ المُمتَص من هذا الطولِ الموجي قبلَ أن يصلَ إلينا على الأرض. ومن ثَم فإن النسبة 100% تعني أن الغِلافَ الجوي غيرُ مُنفِذٍ تماماً عندَ هذا الطول الموجي؛ أيْ أنّ هذا الطولَ الموجي يُمتَصُّ بالكامل ولا يصِلُنا منه شيء. وهكذا فإن الضوء المرئي هو أحدُ نطاقاتِ الأطوال الموجية القليلة التي تنفذ خلاله.[22] تُمتصُّ الأطوالُ الموجية للأشعة فوق البنفسجية بدرجةٍ كبيرة في الغِلاف الجوي، وهذا من حُسْن حظنا لأنها ضارةٌ بالحياة، لكنه أمرٌ مُؤسِف للأنشطة الفلكية الرصدية؛ لأنه يعني حاجتَنا إلى نقلِ أجهزةِ الرصد فوقَ الغِلاف الجوي الذي يمتصُّها.



68- يتَّسِمِ الغِلافُ الجوي للشمس ببِنْيةٍ شديدةِ التعقيد، ليس فقط من الناحيةِ المكانية وإنما يشملُ ذلك درجةَ الحرارة أيضاً، والأطوالُ الموجية التي تُظهِر درجاتِ حرارةٍ مختلفة تَعرضُ أجزاءً مختلفةً من الغِلاف الجوي للشمس. لهذا السبب يحتوي مرصد ديناميكا الشمس التابعُ لوكالة ناسا على تلسكوباتٍ متعددة تعملُ على أطوالٍ موجية مختلفة، بحيث يُمكِنها معاً تكوينُ صورةٍ كاملة للغِلاف الجوي.

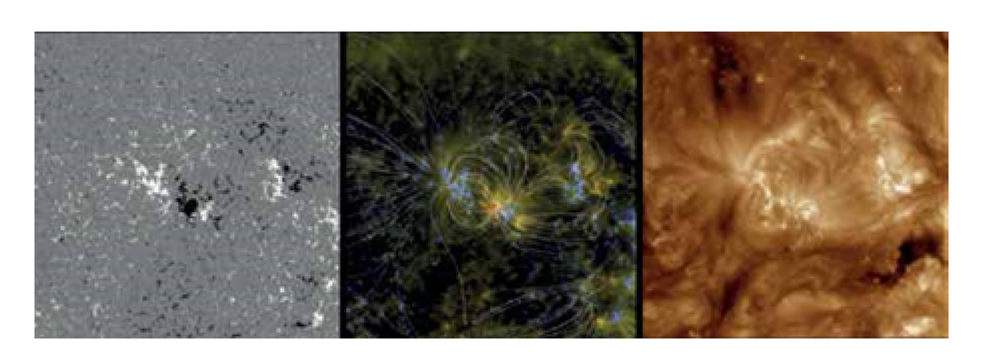
وتنتقلُ أطوالُ موجاتِ الأشعة تحت الحمراء جزئياً في عددٍ قليل من نطاقاتِ الطول الموجي المحدودة، ويُمكِن رؤيتُها من المراصد الموجودة فوق القِمَم الجبلية أو من مناطيدَ عاليةِ الارتفاع أو طائراتٍ مُجهَّزةٍ خصيصاً لهذا الغرض، في حين أنه من الممكن رصْدُ نطاقٍ عريض من الطيف الراديوي على الأرض. بخلافِ هذه الظروف الخاصة القليلة، يتطلَّب رصْدُ جميعِ الأطوال الموجية الأخرى وضْعَ أجهزةِ الرصد فوق الغِلاف الجوي في الفضاء.[23]

وبينما ننتقل عبرَ الطيفِ بدءاً من الضوء المرئي مروراً بالأشعةِ فوق البنفسجية والأشعةِ فوق البنفسجية القصوى، ووصولاً إلى الأطوالِ الموجية للأشعة السينية، فإننا نرصد تدريجياً، بالتقاطِ الصور عبر المرشحات عند أطوالٍ موجية أقصر فأقصر، الأجزاءَ الأشدَّ حرارةً من الغِلاف الجوي للشمس (الشكل 68). في البداية، نرى البُقَعَ الشمسية في الضوء المرئي، أو يُمكِنُنا قياسُ المجالات المغناطيسية على سطح الشمس عند أطوالٍ موجية مرئية، بالأساليب الموضَّحة في الفصل الأول. وباستخدامِ الأطوال الموجية لِلَّون الأزرق يُمكِنُنا رؤيةُ ما هو أعلى من الغِلاف الضوئي بقليل، حتى منطقةٍ تُسمى «درجة الحرارة الدنيا»، التي تكون درجةُ حرارتها، كما يشير الاسم، أقلَّ من درجةِ حرارةِ معظم الغِلاف الضوئي، وأقلَّ أيضاً من درجةِ حرارةِ معظمِ الغِلاف اللوني. وعند درجاتِ الحرارة الأعلى، ليس من المنطقي الحديثُ عن «طبقات» الغِلاف الجوي؛ لأن بِنْيةَ الغِلاف اللوني تتَّسِم بأنها شديدةُ التعقيد، كما رأينا في الفصول السابقة، إذ تتكوَّن من شويكاتٍ عمودية حادة، وأجزاءٍ من حلقاتٍ ومكوناتٍ أخرى ثلاثيةِ الأبعاد. وينطبق الأمرُ ذاته عندما نتجه إلى الأطوال الموجية الأقصر؛ إذ تهيمن البِنَى شبهُ الحلقية للبلازما، التي تكون مُقيَّدةً ومحصورةً بالمجالات المغناطيسية التي تتخلَّل الغِلافَ الجوي. وطوال الوقت نواصلُ الطريقةَ التي بدأها هيل في اختيارِ مناطقِ الطول الموجي المحدودة حولَ خطٍّ طيفي مُعيَّن، كي نحصلَ على صورةٍ للمناطق التي تُنتِج هذا الطولَ الموجي. وفي نطاق الأشعة فوق البنفسجية القصوى، تبلغُ درجاتُ حرارةِ تلك المناطق عدةَ ملايين كلفن.

على الرغم من الجهود المبذولة على مدارِ أكثرَ من سبعين عاماً، لا توجد نظريةٌ مقبولة على نطاقٍ واسع تفسِّرُ وصولَ درجةِ حرارة الإكليل الشمسي إلى هذا الارتفاعِ الهائل. لكنَّ هناك حقيقةً واحدة رئيسة واضحة؛ ألا وهي أن الإكليل هو المنطقةُ الأشدُّ سطوعاً والأعلى من حيث درجة الحرارة، ويَنشأ فيه أقوى مجالٍ مغناطيسي منبعِث من الشمس. عند النظر إليه في نطاقِ الضوء المرئي، نلاحظُ وجودَ البُقَع الشمسية في الأماكن التي تنشأ فيها مجالاتٌ مغناطيسية قويةٌ عبر السطح (انظر الفصل الأول). ولكن إذا حجَبْنا الضوءَ المرئي ولجَأْنا بدلاً من ذلك إلى تصويرِ انبعاثِ الأشعة السينية والأشعةِ فوق البنفسجية القصوى، فإننا نرى أن الغِلافَ الجوي حول البُقَع الشمسية مَلِيءٌ ببِنى معقَّدةٍ ترتبط ارتباطاً واضحاً بالمجال المغناطيسي، وتكون شديدةَ السخونة لدرجةِ أن الضوءَ المنبعث منها يُزاح إلى تلك الأطوالِ الموجية القصيرة. وبفضلِ المُعَدات الأرضية الحديثة والتلسكوبات الفضائية، يُمكِننا الآن رؤيةُ هذا الارتباطِ بوضوح.

يُظهِر الشكل 69 مُقارَنةً بين المجالات المغناطيسية المَقِيسة على سطح الشمس والبِنى الإكليلية التي تَظهر على سطحها في الصور الملتقَطة في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية القصوى. وتبيِّن

اللوحةَ الموجودة أقصى اليسار جزءاً من التمثيلِ المصور لتبايُن المجال المغناطيسي، وتَظهر بها بُقَعٌ باللونَيْن الأبيض والأسود تشير إلى مَواضعِ خروجِ المجال المغناطيسي من السطح، ومَواضع دخولِه مجدداً. توجد في وسطِ هذه الصورة رقعةٌ سوداءُ بها جزءٌ دائري، ويشير هذا المكانُ إلى وجودِ بُقعةٍ شمسية كبيرة.



69- في هذه الصورة الملتقَطة بتاريخ 8 أغسطس 2015، يتَّضِح الارتباطُ الوثيق بين المجالات المغناطيسية القوية على سطحِ الشمس والبلازما الساخنةِ الباعثة للأشعة السينية فوق السطح. وتُظهِر اللوحاتُ الثلاثُ، على الترتيب، المجالَ المغناطيسي للسطح قُربَ منطقةِ البُقَع الشمسية، والمجالَ المغناطيسيَّ المحسوبَ فوق السطح، والبِنْيةَ الإكليلية المرصودة.

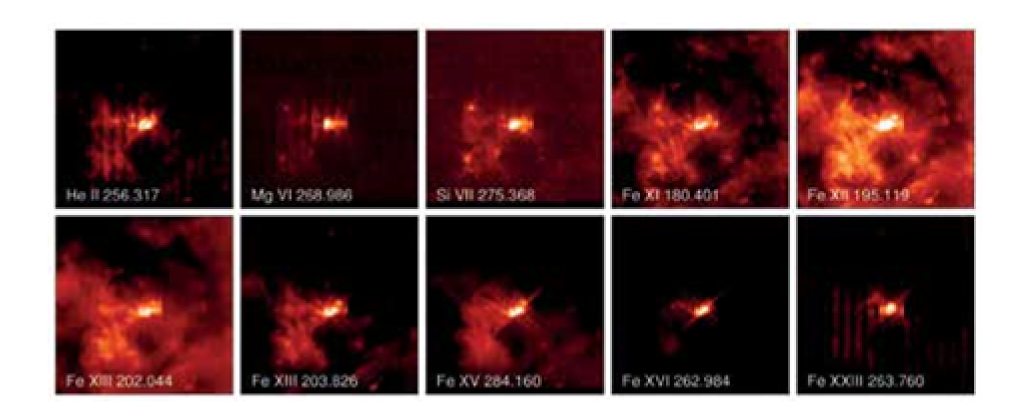
وإلى اليسار والأعلى قليلاً نجد منطقةَ المجال المغناطيسي القطبية المقابِلة (البيضاء). وعلى يمين البُقعة يوجد تركيزٌ آخَرُ للقطبية البيضاء، وهو تعقيدٌ جعَلَ هذه المنطقةَ تُنتِج توهُّجاتٍ شمسيةً على نحوٍ نَشِط. وبالاتجاه أكثر نحوَ اليمينِ نرى منطقةً أخرى ثنائيةَ القطب، باللونَيْن الأبيض والأسود. هذه المنطقةُ أقدمُ، والمجالاتُ بها أقلُّ تركيزاً، وهي أقلُّ نشاطاً أيضاً.

لا نَملكُ حتى الآن طريقةً موثوقاً بها لقياسِ المجالات المغناطيسية المتولِّدة في الإكليل، ولكنْ يُمكِننا تقديرُ تكوينِ المجال فوق السطح بإجراءِ استقراءٍ رياضي من قياساتِ المجال على السطح. هناك عددٌ من الطرائق المختلفة التي يُمكِن إجراءُ مثلِ هذا الاستقراء بها، أيسَرُها ذلك الموضَّحُ في اللوحة الموجودة وسطَ الشكل 69، إذ نلاحظُ وجودَ مجموعةٍ من المجالات المغناطيسية المتشعِّبة من البُقَع الشمسية، ممَّا يعني أن مَجالاتِها المغناطيسيةَ القوية تنتشر في جميعِ الاتجاهات المحيطة بالظل القاتم. ونجد أيضاً أن البُقعةَ الشمسية متصلةٌ بالقطبية البيضاء الموجودة إلى يسارها بواسطةِ مجالاتٍ مغناطيسيةٍ حلقيةِ الشكل. يتوافقُ هذا مع تصوُّرِنا أن هناك حبلاً أفقياً من المجال المغناطيسي يَنبثقُ من داخل الشمس؛ إذ يتفرَّع المجالُ المغناطيسي من أحدِ طرفَي الحُزْمة التي تتَّخِذ شكلَ الرمز أوميغا، عائداً إلى السطح عند الطرف الآخَر. نرى أيضاً أن هذه المنطقةَ قد شكَّلتْ روابطَ مع المنطقةِ الأقدم على اليمين؛ إذ تربط حلقاتٌ مغناطيسيةٌ بين المنطقتَيْن.

عند دراسةِ الصور الملتقَطة في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية القصوى في اللوحة اليُمنى من الشكل، نرى البلازما الإكليليةَ الساخنة - التي تتَّضِحُ فيها حدودُ المجال المغناطيسي نظراً إلى

أنها مقيَّدةٌ باتِّباعِ اتجاهِ المجال - تُظهِر الارتباط نفسَه بين مناطقِ القطبية المعاكِسة، وهو ما يتَّفِق مع استقراء المجال المغناطيسي.

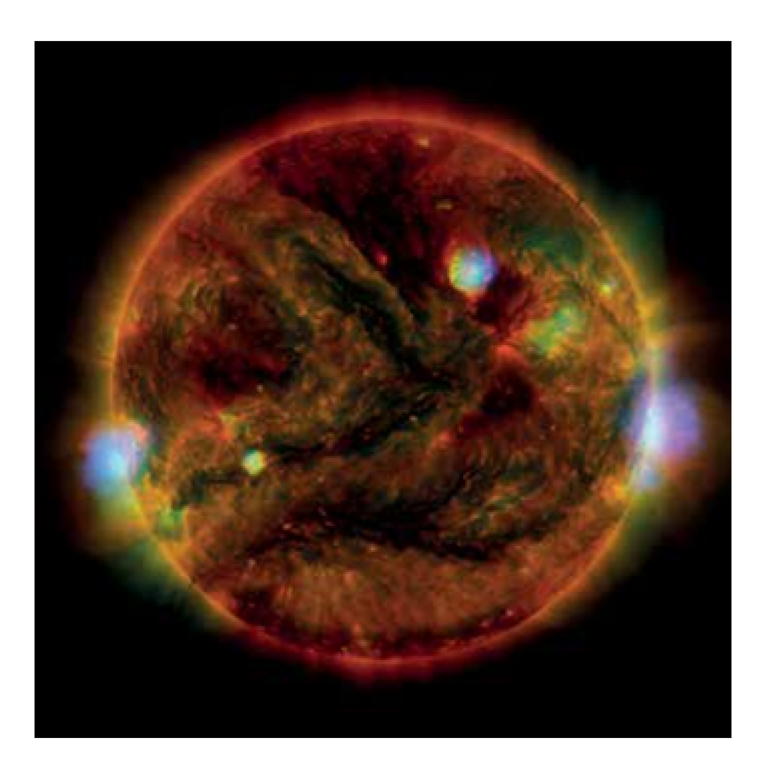
إن إحدى الحالات التي نهتمُّ بفَهْمها بشكلٍ خاص، من حيث تأثيرُها على الأرض ومكوناتِ المجموعة الشمسية الأخرى، هي الإطلاقُ المفاجِئ للطاقة المخزَّنة في الإكليل في أثناءِ نشوءِ إحدى المناطق المغناطيسية. ويُعَد التوهُّجُ الشمسي إحدى نتائجِ هذا الإطلاقِ للطاقة، وهو ما يتَّضِح من النقطةِ المضيئة الصغيرة والمكثَّفة في المنطقةِ النَّشِطة المصوَّرة في الشكل 70 (سنناقشُ في الفصل التالي ظاهرةً ذاتَ صلة؛ ألا وهي الانبعاثُ الكتلي الإكليلي). في حالةِ التوهُّجِ الشمسي، يزدادُ الإكليل سطوعاً وسخونةً سريعاً في منطقةٍ معينة؛ إذ تصلُ درجاتُ الحرارة إلى عشراتِ الملايين، ويتجاوزُ سطوعُه لفترةٍ وجيزة سطوعَ الشمس بأكملها في نطاق الأشعة السينية.



70- توهُّجٌ من الفئة X. تَعرضُ هذه السلسلةُ من الصور الملتقَطة بمِطْيافِ تصوير الأشعة فوق البنفسجية القصوى في مرصد هاينود أجزاءً من الغِلاف الجوي للشمس ذاتَ درجةِ حرارةٍ أعلى على نحوٍ مُطَّرد. وتوضِّح الزاويةُ اليسرى العلوية وجودَ مادةٍ في جزءٍ منخفضِ الحرارة نسبياً من الغِلاف الجوي عند حوالي 70 ألف كلفن، وتستمرُّ الصورُ في التدرُّجِ وعرضِ درجاتِ حرارةٍ أعلى وصولاً إلى باطنِ التوهُّج إذ تتجاوزُ درجةُ الحرارة 15 مليون كلفن في الصورة الموجودة أسفلَ اليمين. تَعرض كلُّ صورةٍ جزءاً محدوداً من التوهُّج، ويُمكِن دمْجُها معاً لتكوينِ صورةٍ ثلاثيةِ الأبعاد.

يتيح لنا الرصْدُ من الفضاء أن نرى أن الإكليل داخلَ المناطق النَّشِطة وحولَها يحتوي على موادَّ لها درجاتُ حرارةِ التوهُّج الشمسي، حتى في غيابِ أيِّ توهُّجاتٍ واضحة. ولقد استُخدِم أيضاً القمرُ الاصطناعي «نوستار» NUSTAR التابعُ لوكالة ناسا، والمصمَّم لتجميعِ ورصدِ الأشعة السينية العاليةِ الطاقة لدراسةِ الأجرام الغريبة في جميعِ أنحاء الكون، مثل الثقوب السوداء والتدفقات المادية الفلكية، لرصد هذه الأشعةِ السينية العاليةِ الطاقة المنبعِثة من الشمس. ويَعرضُ الشكل 71 صورةً مماثِلةً التقَطَها القمرُ الاصطناعي «نوستار» التابعُ لوكالة ناسا ومعهد

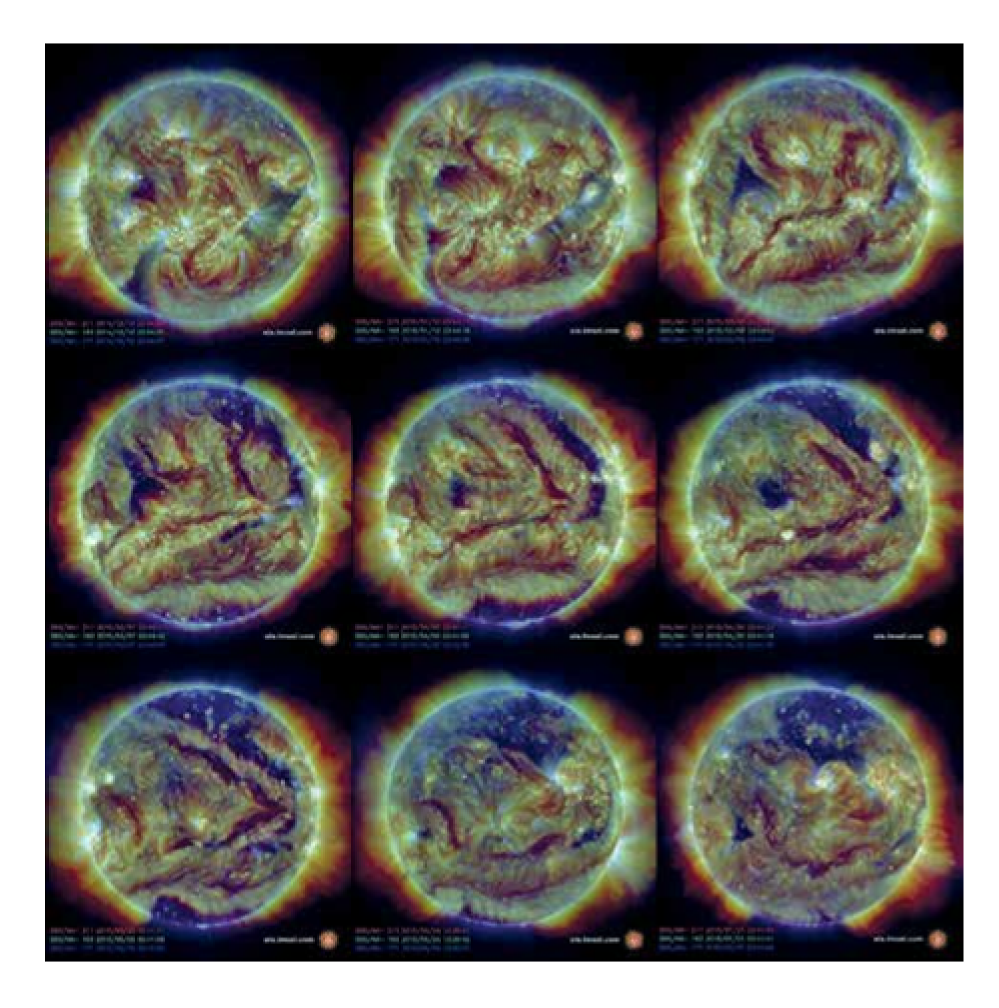
كاليفورنيا للتقنية، مُتراكِبة فوقَ صورةٍ مُلتقَطة في نطاقِ طاقةٍ أقلَّ (نحو 1 كيلو فولت) التقَطَها تلسكوبُ الأشعة السينية الموجودُ على متنِ المَرْكبة هاينود. ويُظهِر البريقُ المائلُ إلى الزُّرْقة، الموجودُ داخلَ المناطقِ النَّشِطة التي التقَطَها تلسكوبُ الأشعة السينية وفوقَها، وجودَ أشعةٍ سينية تتراوح طاقتُها بين 2 و6 كيلو فولت؛ مما يشير إلى وجودِ عمليةٍ تُنتِج بلازما عاليةَ الحرارة شبيهةً بالتوهُّجات الشمسية. وهذه ظاهرةٌ غامضةٌ لا تفسيرَ لها في الوقت الحالي.



71- تُضِيء الأشعةُ السينية الشمسَ في هذه الصورة التي تحتوي على بياناتٍ من تلسكوبِ التحليل الطيفي النووي التابع لوكالة ناسا، والمعروف اختصاراً بنوستار. وتَظهر الأشعةُ السينية العاليةُ الطاقة التي التقَطَها «نوستار» باللون الأزرق، ويمثِّل اللونُ الأخضر الأشعةَ السينية المنخفضةَ الطاقة التي التقَطَتها مُعَداتُ تلسكوبِ الأشعة السينية الموجودِ على متن المَرْكبة هاينود الفضائية. وتَعرضُ بيانات «نوستار»، أشعةً سينية تتراوح طاقاتها بين 2 و6 كيلو إلكترون فولت، وتَعرضُ بياناتُ تلسكوبِ الأشعة السينية للمَرْكبة هاينود طاقاتٍ تتراوح بين 0.2 و2.4 كيلو إلكترون فولت، وتَعرضُ بياناتُ مرصد ديناميكا الشمس، المأخوذةُ بواسطةِ مجمعِ التصوير الجوي، ضوءاً في نطاق الأشعة البنفسجية القصوى، بأطوالٍ موجية تتراوح بين 171 و193 أنغستروماً.

من أجلِ دراسةِ طريقةِ تخزينِ الطاقة وإطلاقِها لاحقاً في الإكليل الشمسي، يجب أن نكونَ قادِرين علـى رصْدِ التطوُّرِ الطويل المدى للمجالات المغناطيسية والبلازما المتوهِّجة المتشابكة معهـا. وفـي وجود الأقمار الاصطناعية في الفضاء، والتي ترصد الشمس بشكلٍ شبهِ مستمر، يُمكِنُنا الآن مُتابَعةُ تطوُّرِ الإكليل على مدارِ أشهُرٍ، بل ولفتراتٍ أطول أيضاً. يَعرضُ الشكل 72 تِسعَ دوراتٍ

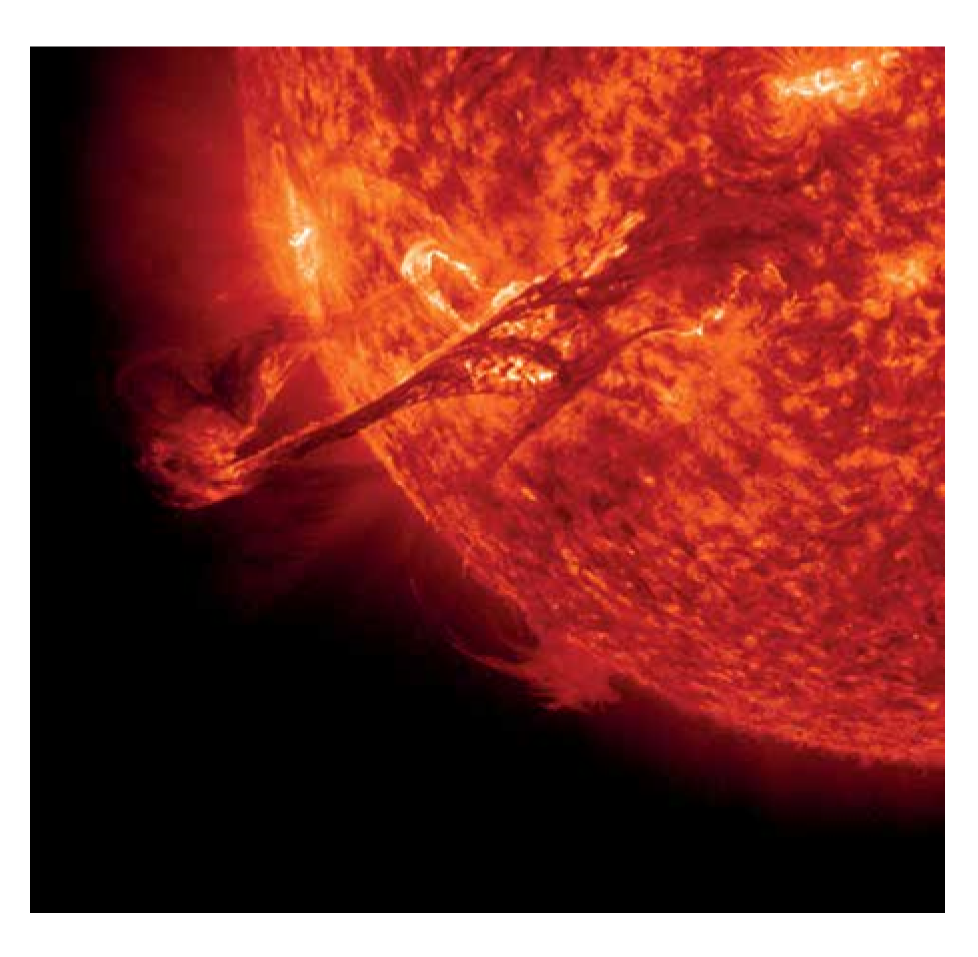
شمسية، مرتَّبة من اليسار إلى اليمين، ومن الأعلى إلى الأسفل، والفاصل الزمني بين الصورُ المُلتقَطة 27 يوماً بحيث يُواجِهنا الجانب نفسه من الشمس



72- يتَّضح التطوُّرُ الواسعُ النطاق للإكليل على مدارِ تِسعِ دوراتٍ شمسية في هذه السلسلةِ من الصور الملتقَطة في نطاقِ الأشعةِ فوق البنفسجية القصوى. وتُظهر الصور الجزءَ ذاتَه من سطحِ الشمس، شهراً تِلوَ الآخَر، من اليسار إلى اليمين، ومن الأعلى إلى الأسفل. وتُرى الطريقةُ التي يؤثِّر بها الدورانُ التفاضُلي للشمس على الإكليل - الغِلاف الجوي فوق السطح المرئي - في هذه السلسلةِ من الصور الملتقَطة على مدارِ ثمانيةِ أشهر. يؤدِّي الدورانُ الأسرعُ لخط الاستواء الشمسي مُقارَنةً بدورانِ القُطبَيْن إلى استطالةِ البِنى بحيث تتَّخِذ شكلَ الحرف V؛ لأن مَعالِمَ دوائرِ العرض الوسطى تتحرَّكُ بسرعةٍ أكبرَ، ممَّا يسبِّب تخلُّفَ مَعالِمِ دوائرِ العرض العليا.

فـي كل صورة. ونظراً لدورانِ خط الاستواء بسرعةٍ أكبرَ من سرعةِ دورانِ القُطبَيْن، كما ناقَشْنا في الفصل الثاني (الشكل 15)، فإن المَعالِمَ القريبة من خط الاستواء تُعاوِدُ الظهورَ فـي المكان ذاته

تقريباً بعد مُضِيّ 27 يوماً، أمَّا المَعالِمُ الموجودةُ عند دوائرِ العرض الأعلى فتُتجاهل تدريجياً. ويؤدِّي هذا الدورانُ التفاضُلي إلى تشكُّلِ أنماطٍ على شكلِ الحرف V، مع وجودِ خطِّ الاستواء عندَ طرفِ الحرف السُّفْلي. يُمكِنُنا أيضاً ملاحظةُ انتشارِ البِنـى الإكليلية عبرَ سطحِ الشمس، والمناطق التـي ظهرتْ ساطعةً ومكثفةً في البداية تصير أكثرَ خفوتاً وانتشاراً، بسببِ دفْعِ مَنابِتها - أيْ جذورِ مَجالاتها المغناطيسية المرتكزة في سطح الشمس - بواسطةِ الحمل الحراري على السطح، ثم انتشارها عبرَ السطح بأكمله. ويشكِّل هذان السلوكان معاً - الدورانُ التفاضُلي والانتشارُ المضطرِب - عنصرَيْن محوريَّيْن في نموذجِ بابكوك- لايتون للدينامو الذي ناقَشْناه في الفصل الثالث، الذي اتَّضح الآن أنه دقيقٌ وصحيحٌ إلى حد كبير.



73- خيوطٌ كبيرة تنبثق من سطحِ الشمس إلى الفضاء بين الكواكب.

الفصل الثامن
عواصف من الشمس: نقاشٌ يدور في أغلبه حول الجُسيمات والمجالات

استغرَقَ التوصُّلُ إلى فَهمِ الصلة بين الأحداثِ التـي تدور علـى الشمس والاضطراباتِ التي تصل إلـى الأرض أكثرَ من قرنَيْن كاملَيْن. ويُعزَى الفضلُ فـي هذا الفَهْم إلى علماءَ وفلاسفةٍ وعلماءِ رياضياتٍ وجيوشِ أُممٍ قوية ومُخترِعين غريبي الأطوار، وذلك على سبيل المثال لا الحصر. وتطلَّبَ الأمر الربطَ بين سلوكِ إبرِ البوصلة، ونقاشاتٍ حول الأساليب الإحصائية، ومُشاهَداتِ الشَّفَق القُطبي والبُقَع الشمسية، والمقترَحاتِ المتعلِّقة بالمناطق الغامضة، وتَخْميناتٍ بشأنِ ذيول المذنَّبات. وقد اندلعتِ الخِلافات والمُجادَلات وجرى تبادُلُ الحججِ المتعارضة بين بعض أعظمِ العلماء فـي العالَم. وصاحَبَ ذلك تخميناتٌ مُلهمة وانتقاداتٌ شَرِسة والعديدُ من النجاحات والانتكاسات. وحُسِم الأمرُ في نهاية المطاف فقط بالرصْدِ المباشِرِ من الفضاء الخارجي، والذي أثبَتَ جذرياً كيف يُمكِن لصلاتٍ تبدو مستحيلةً أن توجدَ بالفعل. ويتضمَّن الجدول 1 قائمةً تلخِّص بعضاً من الخطوات العظيمة التي قُطِعَت نحوَ بلوغِ هذا الفَهْم الحالي.

منذ فترةٍ طويلة، في عام 1515، حذَّرَ توماس مور Thomas More من مَخاطرِ الاعتمادِ على التقنيات الجديدة، وقال معلِّقاً على السكانِ الأصليين لإحدى الجُزر ممَّن حصلوا علـى بوصلةٍ مغناطيسية من بحَّارةٍ أوروبيين:

كانوا يُبحِرون قبلَ ذلك بحذرٍ شديد، وفي فصلِ الصيف فقط، وأمَّا الآنَ فقد تساوت فـي أنظارهم الفصول، ولا يَثِقون إلا فـي حجر المغناطيس الـذي يَجعلهم يَشعرون بالأمان ربما دونَ أن يكونوا آمنين.

كانت هذه الإبرةُ المغناطيسية في واقعِ الأمر صعبةَ الاستخدام. وقد ناقَشْنا في موضعٍ سابقٍ التفاوُتَ بين الشمالِ المغناطيسي والشمالِ الجغرافـي؛ إذ إن القُطبَ الشمالـي المغناطيسي للأرض لا يوجد

فـي الموضع نفسه الذي يوجد فيه القطبُ الشمالي الذي يحدِّده محورُ دورانِ الأرض. ولذا، بات من الضروري وضْعُ خرائطَ توضِّحُ الفرْقَ (أي «الميل الزاوي») بين القُطبَيْن عبر سطح الأرض. إن وضْعَ خرائطَ كهذه يَفِي بأغراضِ المِلاحة، شأنُها في ذلك شأنُ مُخطَّطاتِ عُمقِ المياه والشِّعاب المرجانيـة والكُتَل الأرضية. لكـن موقـعَ القُطبِ الشمالـي المغناطيسي ينحرفُ بشكلٍ ملحوظ خلالَ فتراتٍ زمنية قصيرة نوعاً ما، ويختلف معدلُ تغايُرِ الميل الزاوي بشكلٍ كبير من مكانٍ لآخَر على سطح الأرض؛ ومن ثم يتعيَّن تحديثُ خرائطِ الميل الزاوي طيلة الوقت؛ أيْ كلَّ بضعِ سنواتٍ إذا كان الأمر يقتضي أعلى درجاتِ الدقة المِلاحيَّة. والأسوأ من هذا أنه وُجِد أيضاً أن إبرةَ البوصلة تُظهِر تبايناً يومياً؛ إذ تنحرف قليلاً أثناءَ شروقِ الشمس وتعودُ إلى مَوضِعها في المساء. والأسوأُ من كل ما سبق أنه في أيامٍ عارضة تهتزُّ الإبرةُ على نحوٍ شاذ وتصير بلا نفْعٍ لأغراضِ المِلاحة؛ إذ تُواصِل التأرجُحَ إلى الأمام والخلف.

لم يكن الانحرافُ السريعُ للقطب الشمالي المغناطيسي (الشكل 18)، والحركاتُ المعقَّدة لإبرةِ البوصلة المغناطيسية، إلا بدايةً للصعوبات. وتعيَّنَ تطويرُ نماذجَ معقَّدةٍ للمجال المغناطيسي للأرض حين فشلتِ النماذجُ الأبسط، كما حدَثَ مـع نموذجِ جيلبـرت الثنائيِّ القُطب البسيط، الذي أسقَطَ نموذجَ هالي الأكثرَ تعقيداً. وأدَّت العلاقات المحيرة بين ظواهرَ تبدو مُتباينة، مثل الشَّفَق القُطبي والبُقَع الشمسية، إلى اندلاعِ جِدالاتٍ بشأن أساليبِ التحليل الإحصائية وتطويرِ طرائق جديدة لتقييمِ الروابط العَارِضة إحصائياً. واستَعَرَتْ جِدالاتٌ عظيمة حولَ ما إذا كانت الشمسُ هي التي تتسبَّبُ في التأثيرات المقترَحة على الأرض، وكيف يمكن ذلك فـي ضوءِ عدمِ وجودِ روابطَ مرئيةٍ بين الاثنين. وشُيِّدَت مُعَداتٌ جديدة ووُضِعَت نظرياتٌ مستحدثة. في الواقع، دخلَ هـذه المعركةَ كلُّ جانبٍ مـن جوانب ما نَعُدُّه «منهجاً علمياً».

الجدول 1

1724	اخترع صانعُ الساعات جورج غراهام George Graham إبرةً مغناطيسية حسَّاسة بإمكانها رصْدُ التغييراتِ الطفيفة في المجال المغناطيسي للأرض، وعثر على تباينات نهارية.
1741	أثبـت أنـدرس سلسيوس Anders Celsius وتلميذُه أُو بـي هيورتر O. P. Hiorter أن تلك التباينات المغناطيسيةَ يُصاحِبُها شَفقٌ قُطبي، وعمل سلسيوس بالتعاوُن مع غراهام للبَرْهنة على أن هذا الأثَرَ واسعُ الانتشار، وليس محلياً.
1843	نشرَ هاينريش شواب سجلاتٍ للبُقَعِ الشمسية، وأثبـت أنَّ عددَ البُقَع يزدادُ ويقلُّ بانتظامٍ في دوراتٍ قَدْرُها عشْرُ سنوات تقريباً.

1851 نشر ألكسندر فون هومبولت البياناتِ التي جمَعَها شواب في أطروحتِه «الكون».

1852 ربطَ إدوارد سابين Edward Sabine بين دورةِ البُقَع الشمسية ومعدَّلِ الاضطرابات المغناطيسية وحجمها.

1859 رأى ريتشارد كارينغتون Richard Carrington وهَجاً أبيضَ، ولاحظَ أنـه يكون مَتبوعـاً باضطراباتٍ مغناطيسيةٍ فوريـة ومتأخرةٍ وشَفقٍ قُطبي.

1878 اقتـرح بلفـور سـتيورات Balfour Stewart أن التباينـات النهارية لإبرة البوصلة ناجمةٌ عـن تياراتِ الغِلاف الجوي العلوي (الأيونوسفير).

1892 اخترع هيل مرسامَ الطيف الشمسي، وصوَّرَ السطوعَ على الشمس من توهُّجٍ شمسي. وأثبت وليام إليس William Ellis وجودَ علاقةٍ إحصائية بين تغيُّر المغناطيسيةِ الأرضية والدورةِ الشمسية.

1898 برهنَ إليس على وجودِ علاقةٍ قوية تجمعُ بيـن عددِ البُقَع الشمسية وقـوةِ الانحرافـات المغناطيسية اليوميــة وعـددِ العواصف الشمسية على مدارِ خَمسِ دوراتٍ شمسية كاملة.

1904 أثبت والتر ماندر Walter Maunder وجودَ فترةِ تكرارٍ قَدْرُها 27 يوماً للعواصف المغناطيسية الأرضية، وعرضَ الصورةَ التي التقَطَتها زوجتُه آني ماندر في كسوفِ عامِ 1898 لأشعة الإكليل الشمسي.

1905 اقتـرح جوزيـف لارمـور Joseph Larmor، خـلال عـرض تقديمي آخَر لـوالتر ماندر أمامَ الجمعية الفلكية الملكية، أن الأشعةَ الإلكترونية تحملُ الاضطراباتِ الآتيةَ من الشمس إلى الأرض.

1908 اقترح كريستيان بيركلاند Kristian Birkeland وجودَ تياراتٍ شمسية (تُسمَّى الآن التياراتِ الكهربيةَ الشَّفقية) ناتجةٍ عن «أشعة مهبطية»؛ وقابَلَ سيدني تشابمان Sydney

Chapman هذا المقترَحَ بالازدراءِ والسخرية. أثبت هيل أن البُقَعَ الشمسية مناطقُ مغناطيسيةٌ.

1919 أكّدَ تشابمان أن التباينات المغناطيسيةَ النهارية ناتجةٌ عن الأشعة فوق البنفسجية الشمسية.

1929 أثبت كلٌّ من دبليو إم إتش غريفز W.M.H. Greaves وإتش دبليو نيوتن H. W. Newton أن العواصفَ المغناطيسية الأرضية الكبرى مرتبطةٌ بالبُقَع الشمسية، في حين أن للعواصفِ الصغيرة فترةَ تكرارٍ تبلغ 27 يوماً، ولا علاقةَ لها بالبُقَع الشمسية.

1932 حلّلَ جوليان بارتلز Julian Bartels العواصفَ التي تتكرَّر كلَّ 27 يوماً، وأثبت عدمَ ارتباطها بالبُقَع الشمسية، ورمزَ إلى المصدر الشمسي باسم «المناطق الغامضة» أو M regions.

1933 وضعَ تشابمان Chapman وفيرارو Ferraro نموذجَ «السحابة المغناطيسية» للعواصفِ المغناطيسية، وتضمَّن النموذج «تجويفَ تشابمان- فيرارو» حول الأرض، أو بمعنى آخَر، تضمَّن وجودَ غِلافٍ مغناطيسي.

1951 حلَّل لودفيغ بيرمان Ludwig Biermann ذيولَ المذنَّبات، واقترح وجودَ فيضٍ من الجُسيمات آتٍ من الشمس، وهو ما يفسِّر سببَ إشارة الذيولِ دائماً بعيداً عن الشمس.

1958 اقترح يوجين باركر أن درجةَ الحرارة المرتفعة للإكليل تؤدِّي إلى توسُّعِه المستمر على صورةِ رياحٍ شمسية أسرعَ من الصوت، وهو المقترَح الذي سخر منه تشابمان.

1962 رصدت المَرْكبتان الفضائيتان لونيك 1- 3 3 -1 Lunik وماريner 2 Mariner II رياحاً شمسيةً أسرعَ من الصوت.

1973 رُصِدَت الثقوبِ الإكليلية بوصفها مصدرَ التدفُّقات المتكررة العالية السرعة. سُرعانَ ما أُطلِق على هذه التدفُّقاتِ الإكليلية العابرةِ اسمُ الانبعاثات الكتلية الإكليلية، وجرى التثبُّت من كونها سُحباً مغناطيسيةً ومَصادرَ العواصفِ المغناطيسية الأرضية.

العواصف المغناطيسية

حظِـي العالِم ألكسندر فـون هومبولت بأعلـى قدرٍ مـن الشُّهرة والحَفاوة والتقدير لآرائه خـلالَ النصفِ الأول من القـرن التاسـع عشر. واستكشفَ نِطاقاً عريضاً مـن الموضوعات، مدفوعاً بطـاقةٍ لا تَنضبُ، واخترعَ فعلياً مفهومَ النظام البيئي وكشفَ الستارَ عن تعقيداتِ العالَمِ الطبيعي بطرائق ألهمَتْ داروين Darwin في وقتٍ لاحق مـن القرن نفسه. وكـان من بين الاهتماماتِ العديـدة لفون هومبولت أحجيةُ المغناطيسية الأرضـية وتبايناتها؛ ولذلك أدرَجَ استخدامَ الآلاتِ المغناطيسية الحسَّاسة في رحلته إلى أمريكا الشمالية في عام 1799، وسجَّلَ آلافَ القراءات حتى وقتِ عودتِه إلى برلين في عام 1804؛ حيث واصَلَ مُشاهَداتِه المغناطيسية. وبعد ملاحظةِ وجودِ صلةٍ بين الشَّفَقِ القُطبي واضطراباتِ الإبرة المغناطيسية، صاغَ فون هومبولت مصطلحَ «العاصفة المغناطيسية» ليَصِفَ هذه الظاهرة، وما زلنا نستخدمُ هذا الاسمَ حتى يومِنا هذا. وانتقلَ بعد ذلك إلى باريس في عام 1807 وقضى العشرين عاماً التالية مُنهمِكاً في كتابةِ النتائج التي توصَّلَ إليها.

تعامَل فون هومبولت مع مشكلةِ العاصفة المغناطيسية بالطاقة المتأجِّجة والعُمق نفسيهما، والْتَمسَ الدعمَ من علماءَ بارِزين أمثال كـارل فريدريـش غـاوس Carl Friedrich Gauss وفلهيلـم فيبرWilhelm Weber كـي ينضَّمـا إليه فـي محاوَلةِ فَهْمِ طبيعةِ مصـدرِ المجال المغناطيسـي للأرض واضطراباتـه، وأقنَعَ البلاطَ البروسي بتمويلِ شبكةٍ مـن محطات الرصد المغناطيسية عبرَ أوروبا وروسيا. ولِكي يوسِّعَ نطاقَ هذه الشبكة أكثرَ وأكثر، عملَ خِلسةً مع نظيرِه البريطاني إدوارد سابين ليُنشِئَ محطات رصد مغناطيسيةً في كل أرجاءِ الإمبراطورية البريطانية.

استمرت المُشاهَداتُ لعقود، وتدفَّقتِ البيانات من كلِّ مكانٍ في العالَم، وانكبَّ سابين على رسم خريطة للانحرافات في محاوَلةٍ منه للعثور على نَمَط مُحدد. وأخيراً، في عام 1850 نشَرَ فون هومبولت كتابَه المذهِل «الكون» (Kosmos)، الذي اشتملَ على وصفٍ لاكتشافِ شواب دورةَ البُقَعِ الشمسية. وفحصَ سابين بياناتِ البُقَع الشمسية (بعدَ أن لفتَتْ زوجتُه إليزابيث ليفيس Elizabeth Leeves نظرَه إليها أثناءَ ترجمتها كتـابَ «الكون») ووجَدَ ارتباطَيْن أساسيَّيْن: أن عـددَ البُقَع الشمسية يتوافقُ مع مخطَّطات العواصف الشمسية التي وضَعَها بشكلٍ مثالي، وأنَّ قوةَ الانحرافات اليومية لإبرةِ البوصلة تتوافقُ مع متوسطِ عددِ البُقَع الشمسية خلالَ كلِّ دورة. وبهذا نشَبَ جدالٌ استمرَّ قرناً كاملاً حولَ احتماليةِ وجودِ رابطٍ بين النشاطِ الشمسي والاضطراباتِ الأرضية وطبيعةِ هذا الرابط.

وعلى الرغم من أن ذلك لم يكُن واضحاً في ذلك الحين، فإن جزءاً كبيراً من هذه الأحجيةِ كان قد تكشَّفَ في عام 1859 عندما تصادَفَ أنْ سجَّلَ ريتشارد كارينغتون وجودَ البُقَع الشمسية في الوقتِ نفسه الذي حدث فيه وهَجٌ أبيضُ نادر. إن التوهُّجاتِ الشمسيةَ الشديدة الضخامة والأكثرَ حدةً هي وَحْدها التي يُمكِن رصْدُها في الضوء الأبيض دونَ استخدامِ مرشحاتِ أطوالٍ موجيـة خاصـة ضيِّقةِ النطاق؛ لذا كان هذا الحَدَثُ استثنائياً، وسنناقشُ الاضطراباتِ الأرضيةَ المصاحِبة له في موضعٍ لاحق من هذا الفصل. كان من بين المُشاهَداتِ التي فحَصَها كارينغتون السجلُّ المغناطيسي

في «مرصد كيو» القريب، والذي يُعَد جزءاً من شبكةِ الرصد المغناطيسية التي أسَّسَها سابين. أصدَرَ مرصد كيو تقريراً عن اضطرابٍ قصيرِ الأمد حدَثَ في وقتِ التوهُّج، تلته عاصفةٌ مغناطيسية طويلةُ الأمد بعدَ ثماني عشرةَ ساعة؛ مما يوحي بحدوثِ ظاهرتَيْن مختلفتَيْن مرتبطتَيْن بالتوهُّج، وانتشرتْ إحداهما بسرعةِ الضوء تقريباً (والتي بموجبها يصلُ الضوءُ القادم من الشمس إلى الأرض في نحو ثماني دقائق)، وانتشرت الأخرى بسرعةٍ أبطأ كثيراً تصل إلى 5 ملايين ميل في الساعة «فقط».

لكن مسألةَ التأثيرات السريعة في مقابلِ المتأخرة ولَّدتْ نوعاً من الارتباك، وأدَّى هذا التشكُّكُ فيما إذا كانت هذه الصلةُ محضَ صدفةٍ، إلى عرقلة التقدُّمِ في فَهمِ معنى هذه المُشاهَدات. ومع ذلك، استمرتْ هذه الصلاتُ الإحصائية بين عددِ البُقَع الشمسية والعواصفِ المغناطيسية. وفي عام 1880، نشَرَ وليام إليس دراسةً موسَّعة أكَّدَ فيها العملَ السابق لسابين وغيرِه، وأوضَحَ وجودَ صلةٍ بين حجمِ انحرافاتِ إبرة البوصلة اليومية ومتوسطِ عددِ البُقَع الشمسية. وفي عام 1892 نشَرَ دراسةً أخرى أوضح فيها أن بدايةَ العواصف المغناطيسية الأرضية في جميعِ أنحاءِ العالَم كانت مُتزامِنةً بالفعل، بحيث تبدأ في الوقت ذاته في جميعِ المواقع بوجودِ فارقٍ لا يتعدَّى كسْراً من الدقيقة الواحدة، واقترح وجودَ شيءٍ ما خارجَ كوكبِ الأرض يسبِّب هذه العواصف.

مُنِي البحثُ عن آليةٍ، يُمكِنها تفسيرُ كيفية تأثير الشمس على الأرض بهذا الشكلِ، بانتكاسةٍ كبرى في عام 1892 على يدِ رئيسِ الجمعية الملكية اللورد كلفن Lord Kelvin، الذي عرَضَ أمامَ الجمعيةِ حساباً لقدْرِ الطاقة التي تحتاجها الشمس «بوصفها مغناطيساً» كي تولِّدَ التأثيراتِ التي نراها على الأرض. وباستخدامِ نموذجٍ غيَّرَ فيه المغناطيسُ الكلي للشمس قُوتَه فجأةً، أجرى حساباتٍ تفيد بأن الشمس ستحتاجُ إلى ما يُعادِل طاقةَ أربعةِ أشهرٍ كاملة كي تولِّد تأثيراتٍ مغناطيسيةً تَدُوم فقط ثماني ساعاتٍ على الأرض، مما جعَلَه يَخلصُ إلى أنَّ الصلاتِ المرصودةَ ما هي إلا «مَحْض صدفة». وتبيَّنَ فيما بعدُ أن مشكلةَ هذه الحسابات هي أنه استخدَمَ نموذجاً غيرَ صحيحٍ للظاهرة.

كان عام 1898 عاماً عادياً للغاية من المنظور التاريخي، واشتملتْ أهمُّ أحداثِه البارزة على اندماجِ بروكلين مع مدينةِ نيويورك لتكوين الأقاليم الخمسة المعروفة حالياً، وانضمامِ هاواي إلى الولايات المتحدة، واستحواذِ الولايات المتحدة على بورتوريكو وغوام والفلبين بعد الحربِ الأمريكية الإسبانية. لكن في نطاقِ الفيزياء الأرضية الشمسية الأكثرِ محدوديةً، أُحرِزتْ بعضُ الخطوات المهمة بفضلِ وليام إليس، وزوجٍ وزوجتِه يُدْعَيان إدوارد والتر ماندر وآني راسل ماندر.

نشَأ إدوارد والتر ماندر في أسرةٍ فقيرة، وارتادَ كليةَ كينغز لندن، وعملَ في مصرفٍ كي يسدِّدَ مصروفاته التعليمية. وبالرغم من أنه لم يُكمِل دراستَه، ولم يَنَلْ قطُّ درجةً علمية، فقد أتاح أحدُ قوانينِ إصلاحِ الخدمة المدنية له في عام 1873 اجتيازَ اختبارٍ للحصول على وظيفةِ مساعدٍ في المرصد الملكي في غرينيتش. كان الفلكيُّ الملكي جورج بيدل آيري قد فاز مؤخراً في صراعٍ سياسيٍّ ليتولَّى مسؤوليةَ المُشاهَداتِ الشمسية المنتظِمة التي لم تَعُد تُؤخَذ من مرصد كيو، وكان في حاجةٍ إلى طاقمِ عملٍ أكبرَ لهذا العمل الإضافي. وتمثَّلتْ وظيفةُ ماندر في التقاطِ صورٍ روتينية

يومية وأطيافٍ للشمس وبُقَعها. وتحسَّنَ وضْعُ ماندر في العمل عندما تقاعَدَ آيري الحاد الطباع في عام 1881 وخلَفَه مساعِدُه وليام كريستي William Christie في منصبِ الفلكي الملكي.
وسرعانَ ما عزَّزَ كريستي مكانةَ المُشاهَدات الشمسية بينَ مَهامِّ المرصد، وقلَّدَ ماندر منصبَ رئيسِ القسم الشمسي. وفي عام 1891 حصل ماندر على مساعِد، ولإيمانه الراسخ بضرورةِ اضطلاع النساء بدورٍ احترافي في العلوم، عيَّنَ اختصاصيةَ رياضياتٍ أيرلندية شابَّة تُدعى آني سكوت ديل راسل Annie Scott Dill Russel، خريجة كلية غيرتون بكامبردج. وكانت تلك هي المرة الأولى التي تَحْظى فيها امرأةٌ بوظيفةٍ في المرصد الملكي.

تقلَّدتْ آني في بادئ الأمر عملاً جعلَها أشبهَ «بالحاسِب الآلي»، لكن اتَّضَحَ فيما بعدُ أنها عالمةُ فلكٍ ماهِرة، وكان لها نصيب الأسد في مَهامِّ جمْعِ البيانات والتسجيل، واختراع كاميرا واسعةِ المجال تولَّتْ جامعتُها القديمة كامبردج جزءاً من تمويلها. وتزوَّجَ إدوارد وآني في عام 1895، وهو الأمر الذي استلزم ترْكَها الوظيفة، بما أنه لم يكُن مسموحاً للنساء المتزوِّجات بالعمل في المرصد، أو بالخدمةِ المدنية عموماً. وواصَلَ الزوجان العملَ معاً، وقرَّرا استخدامَ كاميرا آني لتصويرِ كسوفٍ شمسي من المقرَّر أن تَشهَدَه الهند في الثاني والعشرين من يناير عام 1898. وبالرغم من أن دورةَ البُقَع الشمسية كانت قد بلغتْ نهايتَها في تلك الفترة، مما يعني أن معدلاتِ النشاطِ كانت أقلَّ من معدلاتها مُقارَنةً بوقتِ الذُّرْوة، فقد كان الإكليل ساطعاً بشكلٍ استثنائي في الكسوف، ورصدَتِ الكاميرا مَشاهِدَ مذهلةً توضِّح بِنى إشعاعيةً عظيمةَ الاتساع تنبعثُ من قُرص الشمس. ورُصِد أطولُ الشرائط على مسافةِ ستةِ ملايين ميل من حافة الشمس، ممَّا أوحى إلى والتر بأنه ربما يكون قد عثَرَ على حجَّةٍ يُجابِهُ بها اعتراضَ كلفن. فبدلاً من أن تشعَّ الشمسُ تأثيرَها المغناطيسي بانتظامٍ في جميع الاتجاهات، كما افترض كلفن، ربما يَسْري هذا التأثيرُ المغناطيسي بشكلٍ ما داخلَ حُزَمٍ ضيِّقة من الطاقة. سيكونُ لهذا عظيمُ الأثر على حساباتِ كلفن؛ إذ سيقلِّل جذرياً من القدْرِ الإجمالي للطاقة المطلوبة. ومن شأنِ هذا أن يفسِّرَ كذلك لماذا تسبِّب بعضُ الأحداث الشمسية اضطراباتٍ على الأرض بينما لا تفعلُ الأحداثُ الأخرى ذلك؛ إذ يعتمد الأمرُ على ما إذا كان الشعاعُ موجَّهاً نحوَ الأرض.

اتَّضَح أن الشرائطَ التي سجَّلَها الزوجان ماندر في كسوفِ عامِ 1898 لم تكُن مصادرَ العواصفِ المغناطيسية الأرضية، لكنها وضعتْ والتر على الطريقِ الصحيح نحوَ بناءِ حجةٍ مُقنِعة، تطلَّبتْ ثمانيةَ أعوامٍ من الإعداد. في الوقت ذاته، تابَعَ وليام إليس العملَ الذي كان قد أعلَنَ عنه سابقاً حول العلاقةِ الإحصائية بين البُقَعِ الشمسية والعواصفِ المغناطيسية الأرضية، هذا العمل الذي أدَّت مُعارَضاتُ اللورد كلفن القوية إلى تَنْحِيته جانباً. ووسَّعَ إليس نطاقَ عمله السابق ليشملَ الفترةَ الكاملة من عام 1841 حتى عام 1896، ليغطِّيَ خَمسَ دوراتٍ شمسية. كانت النتيجةُ واضحةً لا لبسَ فيها؛ إذ توافَقَ متوسطُ عددِ البُقَع الشمسية على مدار الدورة مع قوةِ الانحرافات المغناطيسية اليومية معاً بدقةٍ متناهية. وبالرغم من وضوحِ الصلة، فإن إليس اتَّبَعَ نظريةً شائعة في ذلك الحين، وخَلص إلى أن سبباً ثالثاً ما غيرَ معروفٍ هو الذي يؤثِّر على كلٍّ من الشمس والأرض.

جاءت لحظةٌ حاسمة في حياةِ الزوجَيْن ماندر عندما أدركا أنـه بعدَ أيِّ عاصفةٍ مغناطيسية ضخمة بـ 27 يوماً، يزدادُ احتمالُ حدوثِ عاصفةٍ أخرى، وهو تأخُّرٌ زمني يُمكِن ربْطُه فقط بفترةِ دورانِ

خطوطِ طول المنطقة النَّشِطة في الشمس. وفي عام 1904 أبدى والتر ماندر استعدادَه لعرْضِ تحليله أمامَ الجمعية الفلكية الملكية، مُستنِداً بالأساس إلى علاقةٍ إحصائية مأخوذة من تحليلِ «رسمٍ بياني زمني»، يُعَد بمنزلةِ نُسخةٍ مبكرة من التقنية الحديثة لاكتشافِ تردُّداتِ التكرار في السلاسل الزمنية للبيانات. وأدَّى عَرْضُه التقديمي، الذي تضمَّنَ أيضاً الصورةَ التي التقَطَتها آني ماندر في عام 1898، وإشارةً إلى اقتراحِ العالِمِ السويدي سفانت أرهنيوس Svante Arrhenius بأن جُسيماتٍ مشحونةً ربما تنبعث عن الشمس، إلى اندلاع نقاشٍ طويلِ الأمد، وإلى اتفاقٍ على العودة إلى دراسةِ هذا الموضوع بعدَ بضعةِ أشهر، في عام 1905.

كان نقاشُ الجمعية الفلكية الملكية الذي دار في عام 1905 محتدماً، لكنه انتهى بقبولٍ على مَضضٍ لحقيقةِ ارتباطِ فترة الـ 27 يوماً بأحداثٍ تنشأ داخلَ خطوطِ طولٍ ضيِّقة ومحدَّدة بدقة على الشمس وتظلُّ في مَوضعِها عدةَ أشهرٍ في كلِّ مرة. وانتهى الحال بإقرار خبير الرسومات البيانية الزمنية آرثر شوستر Arthur Schuster بأن تحليلَ ماندر قد يكون صحيحاً، وأيَّدَ عالِمُ الفيزياء وأستاذ الرياضيات البارز البروفيسور ريتشارد لارمور Richard Larmor تحليلَ ماندر الإحصائي واستشهدَ أيضاً بعملٍ حديثٍ يُبرهِن على أنَّ بإمكانِ شريطٍ من الإلكترونات حَمْلَ الطاقة الكهرومغناطيسية من مكانٍ لآخَر.

تابَعَ العالِمُ النرويجي كريستيان بيركلاند بنشاطٍ جَمٍّ هذه الفرضيةَ التي أُطلِق عليها اسمُ الفرضيةِ الجُسيمية، وأنشأ شبكةً من مراصدِ الشَّفَق القُطبي في النرويج، واكتشف نمَطاً عالمياً من التيـاراتِ الكهربية في المناطق القطبية تولِّد اضطراباتٍ مغناطيسيةً. وأجرى تجارِبَ مَعْمليةً باستخدامِ كُرةٍ مُمغنَطةٍ تُسلَّط عليها إلكتروناتٌ في غرفة، مُبرهِناً على أن حلقاتٍ من الضوء تتولَّدُ على مَقربةٍ من قُطبَيْها، تماماً مثلما يحدث على الأرض، واقترح أن الجُسيمات المشحونة التي تصطدمُ بالمنطقةِ القطبية كانت هي المسؤولةَ عن ظهورِ الشَّفَق. لكنَّ الاقتراحَ الذي قدَّمَه في عام 1908 - ويفيد بأن انحرافَ البوصلةِ المغناطيسية أثناء العواصف الشَّفَقية كان ناتجاً عن تياراتٍ كهربيةٍ تتدفَّقُ على امتدادِ مجالاتٍ مغناطيسية تربطُ ما يُعرَفُ الآن باسمِ الغِلاف المغناطيسي بطبقةٍ من الغِلاف الجوي العلوي تُسمَّى الآن الغِلاف الأيوني - قُوبِلَ بالسخرية. وفي عام 1967 أكَّدت قياساتُ الأقمار الاصطناعية وجودَ ما نُطلِق عليه الآن تيارات بيركلاند. وكان هانز ألفين، الذي قُوبِلَ عملُه الخاص بهجومٍ بالغٍ، بالرغم من حصوله على جائزة نوبل، أحدَ القلائل الذين احتَفَوْا بأفكارِ بيركلاند.[24]

باتَ من الواضح تدريجياً أن هناك تصنيفَيْن رئيسَيْن للاضطراب المغناطيسي: الاضطراب المتكرر والاضطراب المتقطع. ووُجِد أن الأحداثَ المتقطِّعة مرتبطةٌ بوجهٍ عام بالبُقَع الشمسية، في حين صُنِّفتِ العواصفُ المتكررة بأنها ناجمةٌ عن «مناطقَ غامضةٍ» غيرِ محدَّدة على الشمس، اكتُشِف أنها مرتبطةٌ بمناطقِ السطوعِ الخفيض في الشَّفَق القُطبي. والآن، بعد أنْ أصبحنا نملكُ القدرةَ على رصدِ الشمس من الفضاء الخارجي، وإجراءِ قياساتٍ محليةٍ مباشِرة للرياح الشمسية في الفضاء،[25] حلَلْنا أحجياتِ الصلةِ بين الأحداثِ التي تدور على الشمس والاضطراباتِ التي تحدث على الأرض. فكِلَا النوعَيْن من الاضطرابات - المتقطِّعة والمتكرِّرة - ينتجُ على الترتيب عن انبعاثاتٍ كتليةٍ إكليلية وثقوبٍ إكليلية. والثقوبُ الإكليلية هي مصدرُ الرياحِ الشمسية العالية

السـرعة، وهـي عبارةٌ عن اندفاع حادٍّ للمادة الإكليلية من المناطق التي صارتْ منفتحةً على الفضاء الكوكبي بحيث يستطيعُ الإكليل أن يهرب تاركاً تلك المناطقَ ذاتَ الكثافةِ الأقل من المادة الإكليلية، وبالتبعية ذات السطوع الأقل. والانبعاثاتُ الكتلية الإكليلية لها صلةٌ أكبرُ بمناطقِ البُقَع الشمسية، لكن يحدث ذلك بعدَ أن تَخرُجَ هذه المناطقُ بشكلٍ كامل إلى سطحِ الشمس وتبدأ في الانتشارِ والتناثُر عبر السطح. والتركيزاتُ الكثيفة للجُسيمات الإكليلية، التـي تُسمَّى الخيـوط، يُمكِنها التجمُّعُ فـي المجالات المغناطيسية لهذه المناطق، وقد تُقذَف أحياناً إلى الفضاء، ومعها المجال المغناطيسي الذي يدعم المادةَ الكثيفة (الشكل 73).

الثقوب الإكليلية والرياح الشمسية

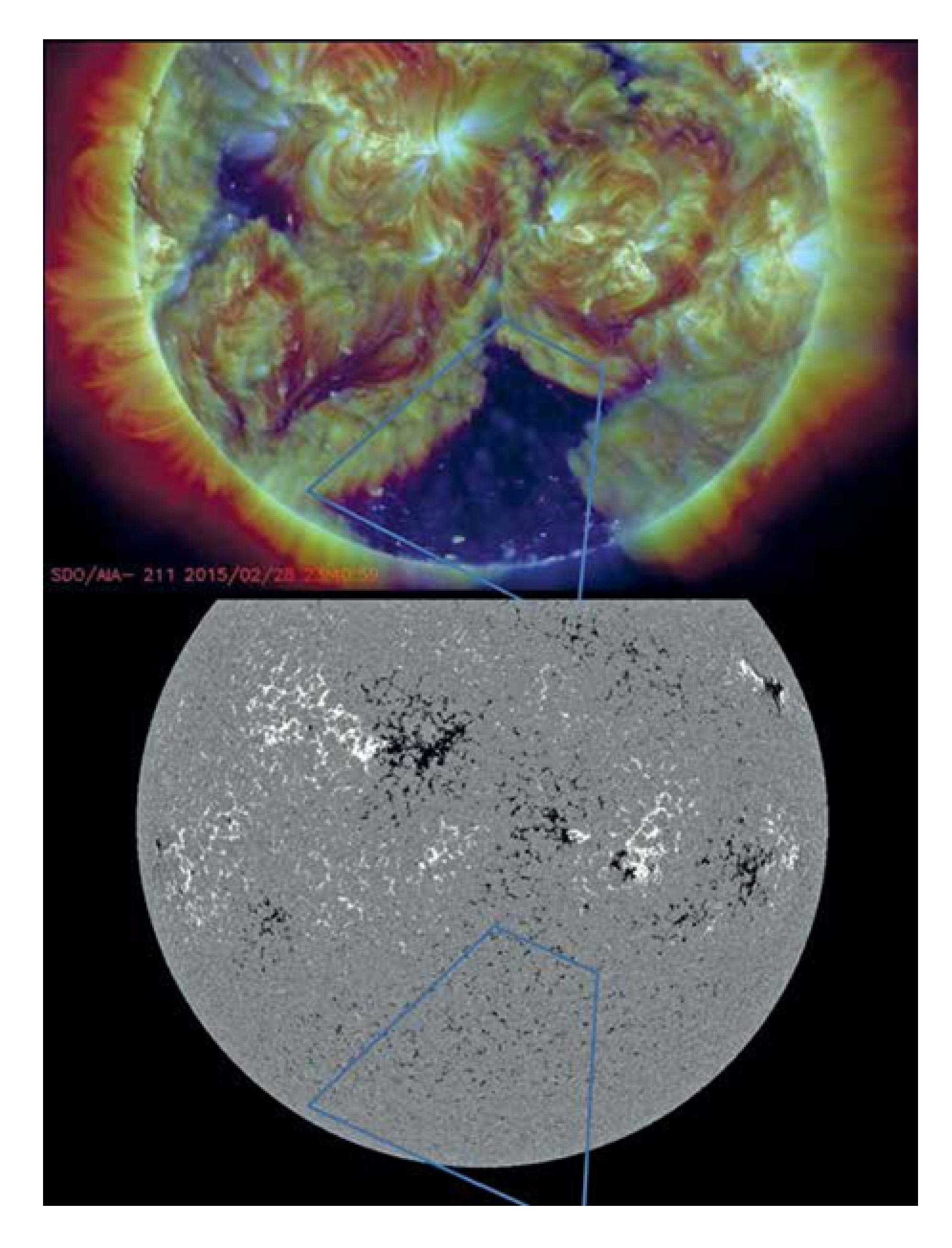
ألمحَتْ المُشاهَداتُ التي أُجرِيت من الأرض إلـى أنَّ العواصفَ المغناطيسية المتكرِّرة تَنبعُ من مناطقَ منخفضةِ السطوع في الإكليل، واحتدَمَ الجدلُ حولَ تحديدِ خواصِّ هذه العواصفِ مثلما احتدَمَ حول مَصدرِها. وتبيَّنَ أن تفسيرَ الصلةِ المحيِّرة بين البُقَع الشمسية والاضطرابـاتِ المغناطيسـية الأرضـية المتكـررة بسيطٌ للغاية، مـع ملاحظةِ أنـه لا توجدُ أيضاً صلةٌ يومية مباشِرة بين الاثنتَيْن؛ إذ تتولَّد الثقوبُ الإكليلية نتيجة للمجالاتِ المغناطيسية المتبقية من اضمحلالِ مناطقِ البُقَع الشمسية الكبرى؛ ومن ثَم فإنها توجد في المَواضِع التي كانت توجد فيها مناطقُ البُقَعِ الشمسية الكبرى، أو على نحوٍ أدقَّ، في المواضعِ التي ذهَبَ إليها الآن المجالُ المغناطيسي الذي كان موجوداً سابقاً في البُقَع الشمسية.

وبمجرد الجمع بين المُشاهَداتُ التي أُجرِيت من الأرض ومن الفضاء، أوضحتِ المشاهدات علـى حدٍّ سواء اضمحلالَ مناطـقِ المجـال المغناطيسي القـوي بالانتشارِ إلى الخارج والاحتضارِ بعيداً عن المجالات المغناطيسية للبُقَع الشمسية وتشكُّل الثقوب الإكليلية المرتبط بها. وسرعان ما بات واضحاً أن هذه المناطقَ الكبيرة المفتوحةَ المجال من الغِلاف الجوي الشمسي تتولَّد عندما تَخضعُ منطقةٌ موسَّعةٌ من سطحِ الشمس إلى هيمنةٍ قطبيةٍ مغناطيسية واحدة، على سـبيل المثال: من القُطبية التابعة لمنطقةٍ نَشِطة تنتشــر عبر السطح وعندما تهيمنُ قُطبيةٌ مغناطيسية واحدة علـى جزءٍ كبير من السطح، يَصطفُّ المجالُ المغناطيسي فوقَ هـذا الجزءِ من السطح، ويُشير نحو الاتجاه نفسه، ويكون ذا اتجاهٍ رأسي. ومع ذلك، سيظل المجالُ المغناطيسي قريباً من الشمس، وسيُعاوِد المجالُ المنبثق من هذا الجزء من السطح الهبوطَ لأسفل وينتهي به الحالُ في جزءٍ آخَرَ من السطح في حالةِ عدمِ وجودِ إكليل. لكن البلازما الإكليلية، التي أُبقِيت قريبةً للسطح، بفعل المجالات المغناطيسية المغلقة، تُدفَع إلى الخارج من السطح بسببِ درجةِ حرارتها العالية، وتعزِّز من ميل المجال نحوَ الانفتاح والإشارة نحوَ الفضاء الكوكبي. وفي النهاية، فإن تفاعُل هذا المزيجِ، من توزيعِ الشّحنات المغناطيسية عبر السطح - مما يجعل المجالَ رأسياً - والضغط الصاعد من البلازما الإكليلية، يتسببان في انفتاح المجال. وهذه المناطقُ المفتوحة هي مَواضِعُ لا تكون البلازما الإكليلية مُقيَّدةً فيها بَعْدُ بالمجال المغناطيسي، وإنما تكون حُرةً لتتمدَّد إلى الخارج وتترك الشمس، في هيئةِ تيارات عاليةِ السرعة مـن الرياح الشمسية. وتَجلبُ هذه الرياحُ المندفعة المجالَ

المغناطيسي معها، ويشكِّل الاثنان معاً بِنى تتَّخِذ شكلَ شرائطَ طويلةٍ تمتدُّ إلى مسافاتٍ عظيمة بعيداً عن الشمس. وسنناقشُ في نهاية هذا الكتاب إلى أيِّ مدى تذهب، وأين ينتهي بها الحالُ جميعاً.

يَعرضُ الشكل 74 مثالاً للصلة بين المجــالات المغناطيسية علــى السطح ووجود الثقوب الإكليلية. في هذا التاريخ، الثامن والعشرين من فبراير عام 2015، كان هناك ثُقبٌ إكليلي ضخمٌ يمتدُّ إلى الأعلى من المنطقة القطبيــة الجنوبية للشمــس نحوَ خط الاستواء، ويأخذُ شكلَ شبهِ مُنحرِف كما هو موضَّحٌ في النصف العلوي من الشكل في صورة الإكليل الثلاثية الألوان المأخوذة من مرصد ديناميكا الشمس التابـع لمجمـع التصوير الجـوي. توضِّح صـورةُ مجالٍ مغناطيســي التُقِطتْ فـي الوقـت نفسِه بواسطةِ جهازِ تصويرِ المجال الشمسي الموجود على متن مرصد ديناميكا الشمس أن هذا الجزءَ من سطح الشمس، الذي يغطِّي القطاعَ الكبير الموضَّح هنا، يَخضَعُ لهيمنةٍ قُطبيةٍ مغناطيسية واحدة، كما تُدلِّل قُطبيةُ المجال المغناطيسي السوداء السائدةُ هنــاك، والمتناثِرةُ وسطَ الخلفية الرماديــة غير المغناطيسية. توضِّح أماكنُ أخرى على الشمس، مثل المنطقةِ النَّشِطة الساطعة في الأعلى وعلى اليسار قليلاً من خط الاستواء (ناحية الشرق)، مجالاً مغناطيسياً ثنائيَّ القُطب على السطح، يضمُّ قُطبيتَيْن بيضاءَ وسوداءَ مرئيتَيْن.

ويُمكِننا رؤيةُ الفارقِ بين وجودِ مجالٍ مغناطيسي ثنائيِّ القطب على السطح، في مقابلِ وجودِ منطقةٍ أحاديةِ القطب ضخمةٍ، باستخدامِ طريقةٍ تستقرئ المجال المغناطيسي المرصود للسطح، لنحسبَ كيف يُمكِن أن يبدوَ المجالُ في الفضاء فوق السطح. فوقَ هذه المناطق من السطح التي بها مجالٌ مغناطيسي ثنائيُّ القطب قوي، نجِدُ أن الإكليلَ يتكوَّن من بِنى مُغلَقة، تبرز من موضعٍ على السطح، وتتقوَّس عبرَه لتُعاوِدَ دخولَه في موضعٍ آخَر قريب. رُصِدت منطقةٌ كهذه في النقاش

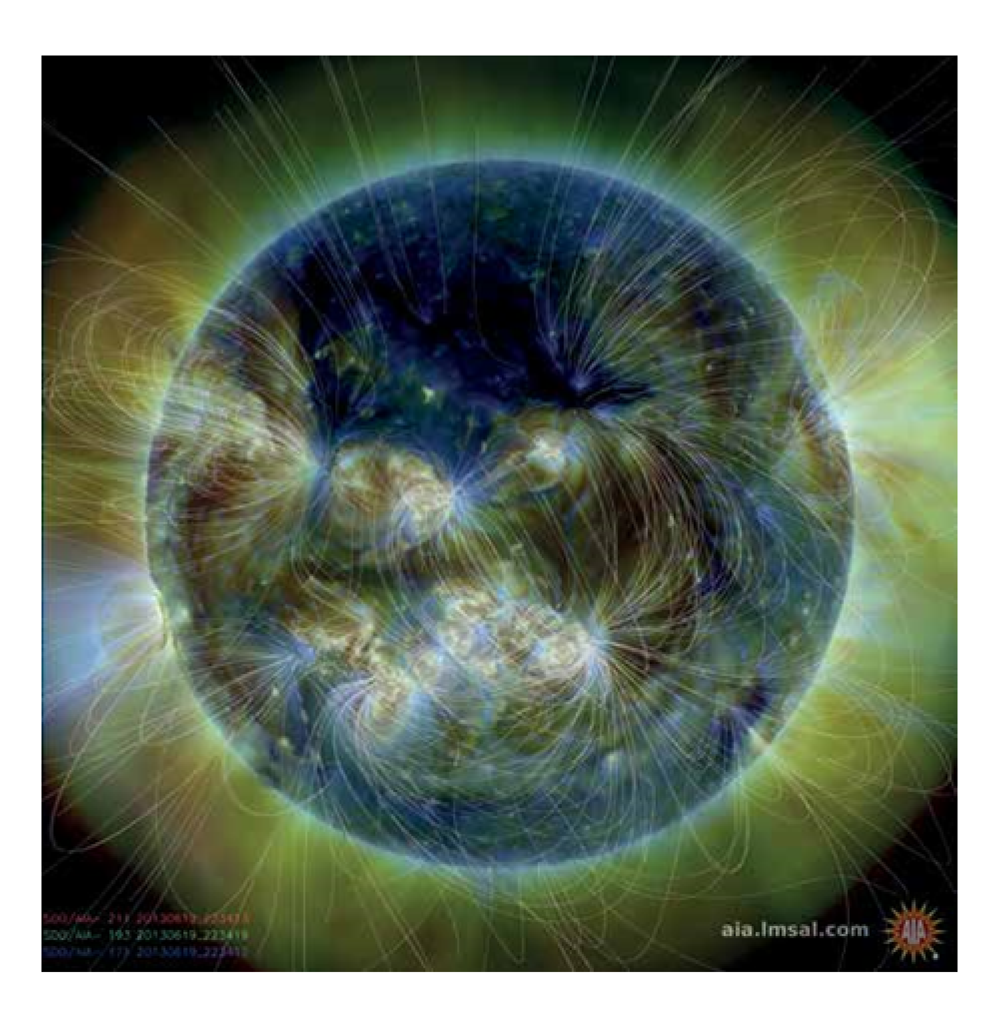


74- صورةٌ مأخوذة من مرصد ديناميكا الشمس توضِّح ثُقباً إكليلياً ضخماً ممتداً إلى الأعلى من المنطقة القطبية الجنوبية (في الأعلى)، في حين توضِّح خريطةُ مجالٍ مغناطيسي مُلتقَطةٌ بجهازِ تصوير المجالِ الشمسي الموجود على متن المرصد الديناميكي الشمسي هيمنةً قُطبيةً مغناطيسية واحدة (تَظهرُ باللون الأسود في هذا العَرضِ للبيانات) في منطقةِ الثُّقب الإكليلي (في الأسفل).

السابق الخاص بالشكل 74، ويُرى بوضوح الانبعاثُ الإكليلي القوي من مناطقِ المجال المغلَق هذه في الشكل 75، وخاصةً في حزامٍ عبرَ خَطِّ الاستواء الشمسي؛ إذ تمتدُّ سلسلةٌ من المناطقِ النَّشِطة عبر القُرص الشمسي من اليسار إلى اليمين. وعلى النقيض من ذلك، اشتملَ القسم العلوي

من الشمس في اليوم الذي التُقِطت فيه هذه الصورة على منطقةٍ شبيهة بتلك الموجودة في الشكل 74؛ إذ يكونُ المجالُ المغناطيسي أحاديَّ القُطب بشكلٍ أكبرَ نتيجةً لانبثاقِ المجالِ المغناطيسي السابق عدةَ مراتٍ فـي الماضي. والنتيجةُ هي أن خطوطَ المجال المغناطيسي التي نُحصِيها تَنزِعُ إلى النتوءِ إلـى الخارج دونَ أن تَعُودَ إلى السطح الشمسي؛ فيُمكِننا رؤيتُها تندفع إلى الأعلى، خارجَ إطارِ الصورة العلوية، وتنفتح فعلياً إلـى الخارج على الفضاء بين الكواكب (ولا نستطيعُ في ظلِّ قُدرتِنا الحالية على القياسِ تحديدَ ما إذا كانتْ ستظلُّ مُغلَقة فعلاً). وهذا هو ما نَعنِيه بقولنا إنَّ الثقوبَ الإكليليـة هـي مناطقُ مفتوحةُ المجـال. فبدلاً مـن تقييدِ البلازما الإكليلية وإبقائها في مَوضِعِها قُربَ السطح، كما يحدث في المناطقِ المغلَقةِ المجال، تكون البلازما الإكليليةُ في الثُّقْب الإكليلي حُرةً كي تتمدَّدَ إلى الخارج وتغادر الشمس، متَّجِهةً إلى الفضاء الكوكبي، وربما إلى الأرض.

وجميعُ كواكب المجموعـة الشمسية تقعُ تقريباً على المستوى نفسه؛ إذ تتراصف تقريباً مع خطِّ الاستواء الشمسي، وتتحرَّك حولَ الشمس في اتجاهِ الدوران الشمسي نفسه. وعليه فإننا هنا على الأرض نشعرُ بالرياح الشمسية التي تُوجَد على هذا المستوى الاستوائي، وحتى وقتٍ قريب لم يكُنْ بوسعنا سوى أن نستنتجَ، بصورةٍ غيرِ مباشِرة، خواصَّ الرياح المُشِعَّة في الاتجاهات الأخرى. تولَّت بعثة أوليسيس Ulysses المعالَجةَ المباشِرة لوجهِ القصور هذا، وهي بَرْنامجٌ مُشتركٌ بين وكالةِ الفضاء الأوروبية ووكالة ناسا، أطلَقَ مجموعةً من التجارِب لدراسةِ بيئةِ الفضاء خارجَ مسار الشمس، بهدفِ المرور مباشَرةً فوق قُطبَي الشمس.

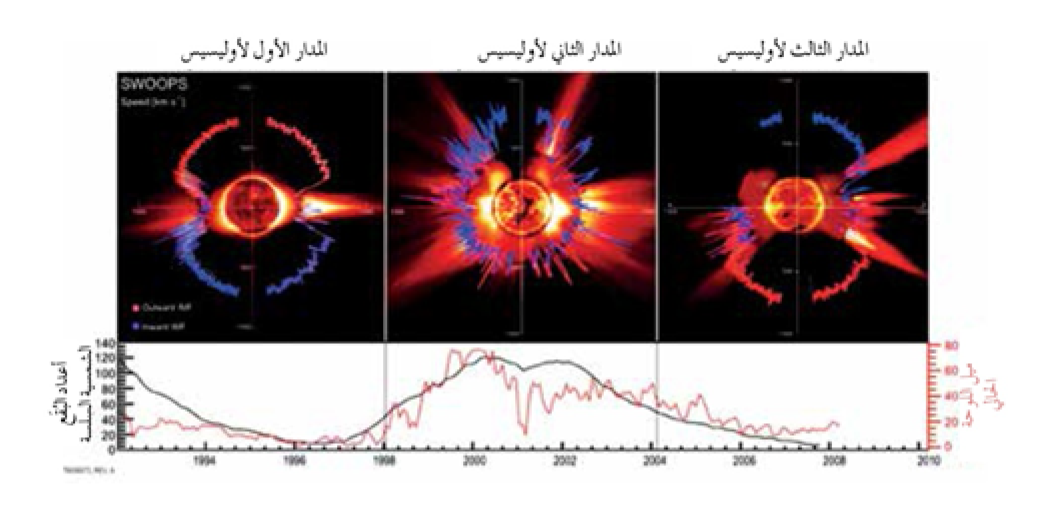


75- يُرى ثُقبٌ إكليلي كبيرٌ في هذه الصورة للإكليلِ البالغةِ درجة حرارته مليونَ درجةٍ في 19 يونيو 2013. وُضِعَت فوق الصورة خطوطٌ تبيّنُ الاتجاهَ والشكلَ المحسوبَيْن للمجال المغناطيسي الذي يتحكَّم في البلازما الإكليلية الساخنة. في المناطق النَّشِطة قُربَ خط الاستواء يكون المجالُ مُغلَقاً بوجهٍ عام، بحيث يبدأ وينتهي عند سطح الشمس، ولكن في الثُّقبِ الإكليلي يكون المجالُ مفتوحاً، بحيث يبدأ عند السطح ويمتدُّ إلى الخارج نحوَ الفضاء الكوكبي، مُتجاوِزاً مدارَ الأرض بكثير.

إن عملية نقْل مَرْكبةٍ فضائية خارجَ مستوى مدار الأرض تتطلَّب قوةً كبيرة وقدْراً هائلاً من الطاقة، لكن التغيرَ المداري أُنجِزَ بالفعل بمساعدةِ أكبرِ كواكبِ المجموعة الشمسية؛ المشتري. انطلقَت المَرْكبةُ الفضائية «أوليسيس» من مركز كينيدي للفضاء على متنِ مكوكِ الفضاء ديسكفري في السادس من أكتوبر عام 1990. وأرسلَتْها الصواريخُ الدافعة بعدَ ذلك بعيداً عن الشمس نحوَ المشتري، ثم استُخدِمَت قوةُ جاذبيتِه القوية لقذْفِ «أوليسيس» خارجَ المسار الشمسي عن طريقِ التحليق العابر في الثامن من فبراير عام 1992. نجحَتِ المهمةُ بشكلٍ فاقَ التوقُّع؛ إذ دارَتِ المَرْكبةُ دورةً كاملة حول الشمس فوقَ كل قُطبٍ من قُطبَيْها ثلاثَ مرات، في مدارٍ إهليلجي

في رحلةٍ استغرقتْ ستَّ سنوات، بحيث عبرتْ أولاً فوقَ القطبِ الجنوبي في عام 1994، ثم القطب الشمالي في عام 1995، ثم من الجنوب إلى الشمال مُجدداً في عامَيْ 2000 و2001، ومرةً ثالثة في عامَيْ 2007 و2008. وأخيراً، بعد أن استنفدَتِ المركبةُ طاقةَ المولِّد الموجود على متنها، أُعلِن انتهاءُ المهمة في عام 2009.

تزامَنتْ هذه الدوراتُ الثلاثُ مع دورةٍ شمسية دُنيا، ثم ذُروةٍ شمسية، ثم دورةٍ دُنيا أخرى، وتغيَّرتْ طبيعةُ الرياح الشمسية جذرياً من كلِّ دورةٍ إلى التي تَلِيها. وتوضِّح الصور في الشكل 76 خطاً مُسنناً يحيط بالشمس ومحورَيْن معقوفين يشيران إلى السرعة المَقِيسة للرياح الشمسية عند كلِّ دائرةِ عرضٍ، والتي حُدِّدت خلالَ دورانِ المَرْكبة الفضائية حولَ الشمس من القُطب الجنوبي إلى خط الاستواء ثم إلى القُطب الشمالي، ثم إلى الأسفل مُجدداً. والأثرُ الأوضح الذي شُوهِد عند التحرُّك من قُطبٍ إلى قطب هو أن سرعةَ الرياح الشمسية تكونُ منخفضةً بالقرب من خطِّ الاستواء (الخط المُسنَّن القريب من الشمس) وأعلى بالقرب من القُطبَيْن (الخط المُسنَّن بعيداً عن الشمس).



76- سرعةُ الرياح الشمسية المَقِيسة من القُطب إلى القُطب حولَ الشمس بواسطةِ تجربة SWOOPS على المَرْكبة الفضائية أوليسيس على مدارِ دورانها الناجح ثلاثَ مراتٍ مُتتابِعة فوق كِلا القُطبَيْن.

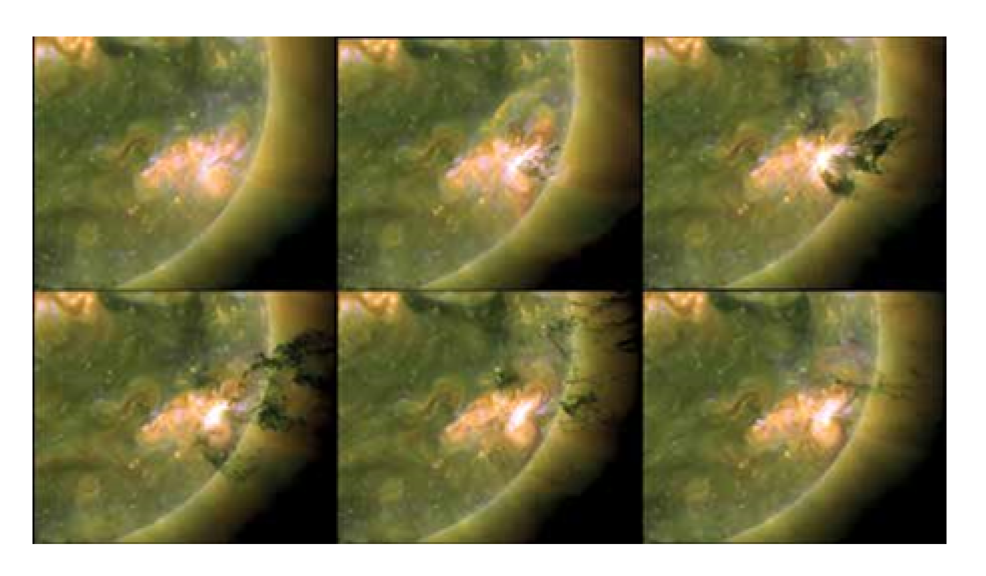
ومن ثَمَّ تبدو مناطقُ المجال المغلَق بالقرب من خط الاستواء وكأنها تَسمحُ بوجودِ رياحٍ شمسية، ولكنْ بسرعاتٍ منخفضة نسبياً، في حين أن مناطقَ الثُّقبِ الإكليلي عند القُطبَيْن تكون مصادرَ الرياح الشمسية العالية السرعة. وشُوهِد هذا في الدورة الدنيا للشمس في اللوحتَيْن اليسرى واليمنى. وتوضِّح اللوحة الوُسْطى، التي شُوهِدت وقتَ الذُّروة الشمسية، نَمَطاً مختلفاً؛ إذ تُغَطِّى الشمس في هذه المرحلةِ من دورةِ البُقَع الشمسية بالعديد من المناطق النَّشِطة، ومن ثَم تصبح المناطقُ المغلَقة والشرائطُ التي تَعْلوها هي المهيمِنة، مع عدمِ وجودِ أي أثرٍ تقريباً للثقوب الإكليلية

القُطبية، باستثناءِ منطقةٍ صغيرة في أقصى الشَمال. ومن ثَم تتَّسِمُ الرياحُ الشمسية بأنها ديناميكيةٌ ومتغيِّرة، وذاتُ سرعةٍ معتدلة بشكلٍ عام، مع هبوبِ رياحٍ أسرعَ قليلاً عند دوائرِ العرض الشمالية الأعلى.

الانبعاثات الكتلية الإكليلية

تمثِّل الثقوبُ الإكليلية ومناطقُ المجالات المفتوحة نصفَ قصةِ الاضطرابات التي تنتشرُ من الشمس إلى الأرض فقط. والسببُ الرئيس الذي زاد من صعوبةِ تحديدِ الصلة بين الاضطرابِ الأرضي ومصدرِه على الشمس هو أنَّ كُلاً من تدفُّقات الرياح الشمسية العالية السرعة من الثقوبِ الإكليلية والانبعاثاتِ الكتلية الإكليلية تسبِّبُ اضطراباتٍ على الأرض، وفي كِلَا هذين النوعَيْن من الأحداث لا يَسهُل رصْدُ مصدرِ الاضطراب من المراصد الأرضية؛ لأنها تَنشأ من مناطقَ غيرِ مرئيةٍ في الغالب لمثلِ هذه الأجهزة. علاوةً على هذا، ثَمة عواملُ أخرى تحدِّد ما إذا كان الحدَثُ مغناطيسيَّ التأثير على الأرض - أيْ له أثر كبير على الأرض- أم لا بعد مُغادَرتِه الشمس، على سبيل المثال: تحديد ما إذا كان سيصطدم فعلياً بالأرض، أم سيمر بجوارها دونَ الاقترابِ بما يكفي للاصطدام بها. وعليه فإن تحديدَ منطقةِ مصدر الاضطراب الشمسية ليس كافياً في حد ذاته لإثباتِ صلةِ الأحداث في الأرض.

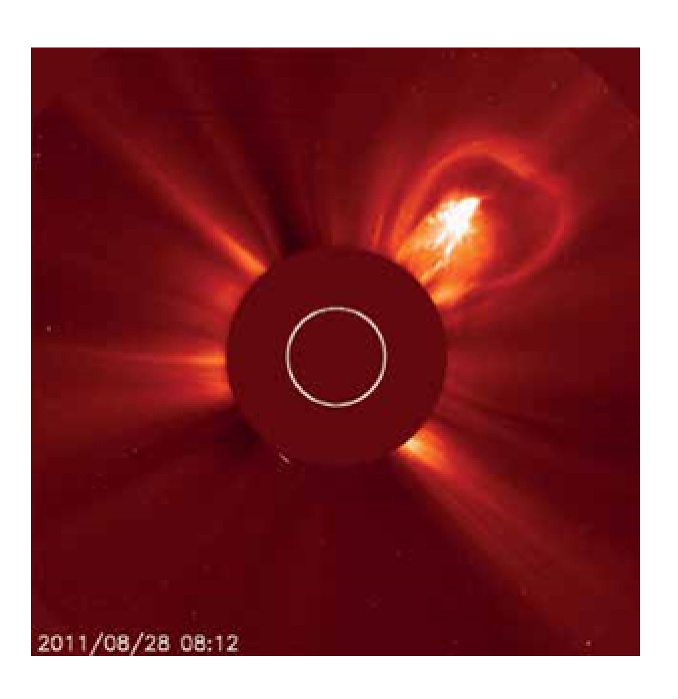
الانبعاثُ الكتلي الإكليلي له مكوِّنان رئيسان: خيطٌ سميك وجبهةٌ مغناطيسية شبهُ كروية تَقُود الحدَثَ، وفي بعض الأحيان يُحسَب التجويفُ بين هذَيْن المكوِّنَيْن بوصفه جزءاً ثالثاً من الانبعاث الكتلي الإكليلي. يوضِّح الشكل 77 انبعاثاً خيطياً ضخماً رُصِد بواسطةِ أدواتِ التصوير الإكليلية لمجمعِ التصوير المتقدم بمرصد ديناميكا الشمس.



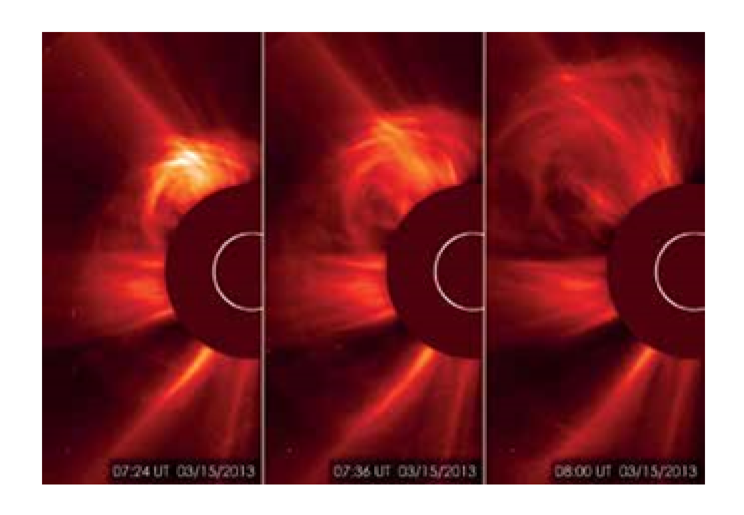
77- يُقذَف خيطٌ ضخمٌ سميك وبارد نسبياً من الإكليل الشمسي في قذْفٍ كتلي ضخمٍ حدَثَ في السابع من يونيو عام 2011. وبما أن الخيطَ باردٌ وسميك، فإنه يمتصُّ الضوءَ فوق البنفسجي

الفائق المنبعِث من الإكليل وراءَه؛ ولذلك يبدو الخيطُ أسودَ مُقارَنةً بالإكليل الساطع.

بلغتِ الفترةُ الفاصِلة بين الإطارات التتابُعية نحوَ عَشرِ دقائق؛ وعليه فقد استمرَّ هذا الجزءُ من الحدَثِ نحوَ ساعة. وتُرى بوضوحٍ جبهةٌ مغناطيسية تَقُودُ انبعاثاً كتلياً إكليلياً، مع وجودِ خيطٍ داخلَ التجويف المتمدِّد، في الشكل 78، وهي عبارةٌ عن صورةِ مرسام إكليلي بالضوء المرئي مأخوذةٍ من مرسام الإكليل الطيفي الواسع الزاوية (لاسكو) الموجودِ على المرصد سوهو. وأثناءَ تمدُّدِ الجبهةِ المغناطيسية إلى الخارج، فإنها تَكسحُ المادةَ الإكليلية أمامَها، وتولِّد فُقَّاعةً من السطوع، وتوسِّعُ الانبعاث. وتُواصِلُ البِنْيةُ الانفجارية بأكملها للانبعاث الكتلي الإكليلي التمدُّدَ خلالَ تحرُّكِها بعيداً عن الشمس، كما هو موضَّح في الشكل 79.

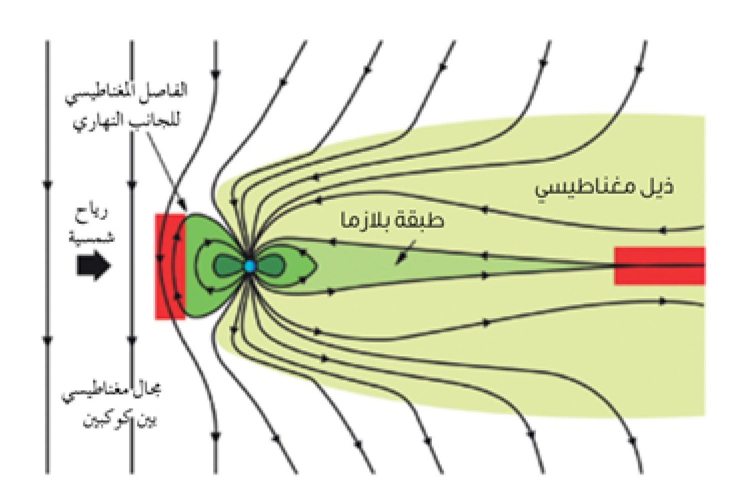


78- الْتَقَط (مرسام إكليل) تلسكوبُ مختبرِ الأبحاث البحرية الموجود على متن المَرْكبةِ سوهو التابعةِ لوكالة الفضاء الأوروبية ووكالة ناسا هذه الصورةَ للشمس وهي تَفيضُ بانبعاثٍ كتلي إكليلي في الثامن والعشرين من أغسطس عام 2011. ويَظهر الخيطُ في الأعلى في هذه الصورة داخلَ الضوءِ الأبيض على هيئة شكلٍ ساطعٍ للغاية ينتشر شعاعياً تقريباً إلى الخارج من القُرص المُحتجب لمرسام الإكليل. (تشير الدائرةُ البيضاء إلى مكانِ الغِلاف الضوئي الشمسي الذي يُعَد مصدرَ الضوء الذي يتشتَّت بفعلِ الإكليلِ وبفعلِ مادةِ الشُّوَاظ الكثيفة). وتُرى الحافةُ الأمامية للانبعاث الكتلي الإكليلي، وهي فُقَّاعةٌ كبيرة من المجالِ المغناطيسي المتمدِّد إلى الخارج، فوقَ النتوءِ على هيئةِ قوسٍ من الانبعاث.



79- الْتَقَط مرسام الإكليل الطيفي الواسع الزاوية (لاسكو) التابعُ لمختبر الأبحاث البحرية، والموجود على متن المَرْكبةِ سوهو التابعةِ لوكالة الفضاء الأوروبية ووكالة ناسا هذه الصورَ لانبعاثٍ كتلي إكليلي سريعِ الحركة في الخامس عشر من مارس عام 2013، من الساعة 3:24 إلى الساعة 4:00 صباحاً حسب توقيت المنطقة الشرقية. وصَلَ هذا الحدَثُ إلى «مستكشف التكوين المتقدم» Advanced Composition Explorer التابع لوكالة ناسا، الذي يقعُ على مسافةِ مليون ميلٍ من الأرض، في الساعة 1:28 صباحاً حسب توقيت المنطقة الشرقية في يوم 17 مارس، وتسبَّبَ في عاصفةٍ مغناطيسية أرضية بعدَ مُضِيِّ بضعِ دقائق.

تَخرجُ السحابةُ المغناطيسية المتمدِّدة للانبعاث الكتلي الإكليلي إلى الفضاء الكوكبي، وتَكتسِبُ مزيداً من الحجم مع اجتيازها الكواكبَ الداخلية إلى الخارج، مروراً بمدارَي المشتري وزحل. وإذا كان الانبعاثُ الكتلي الإكليلي في الاتجاه الصحيح، فقد يَرتطِمُ بالأرض في طريقه إلى الخارج، وإذا كان المجالُ المغناطيسي للانبعاث الكتلي الإكليلي في الاتجاه المناسِب، فقد يتفاعل بقوةٍ مع المجالِ المغناطيسي للأرض. يظهَر هذا التفاعُل في الشكل 80، الذي يوضِّح حدَثاً آتياً من الشمس (على يسار هذه الصورة) يصطدمُ بالامتدادِ الخارجي للمجال الأرضي المواجِه للشمس، والذي يُسمى «الفاصل المغناطيسي».

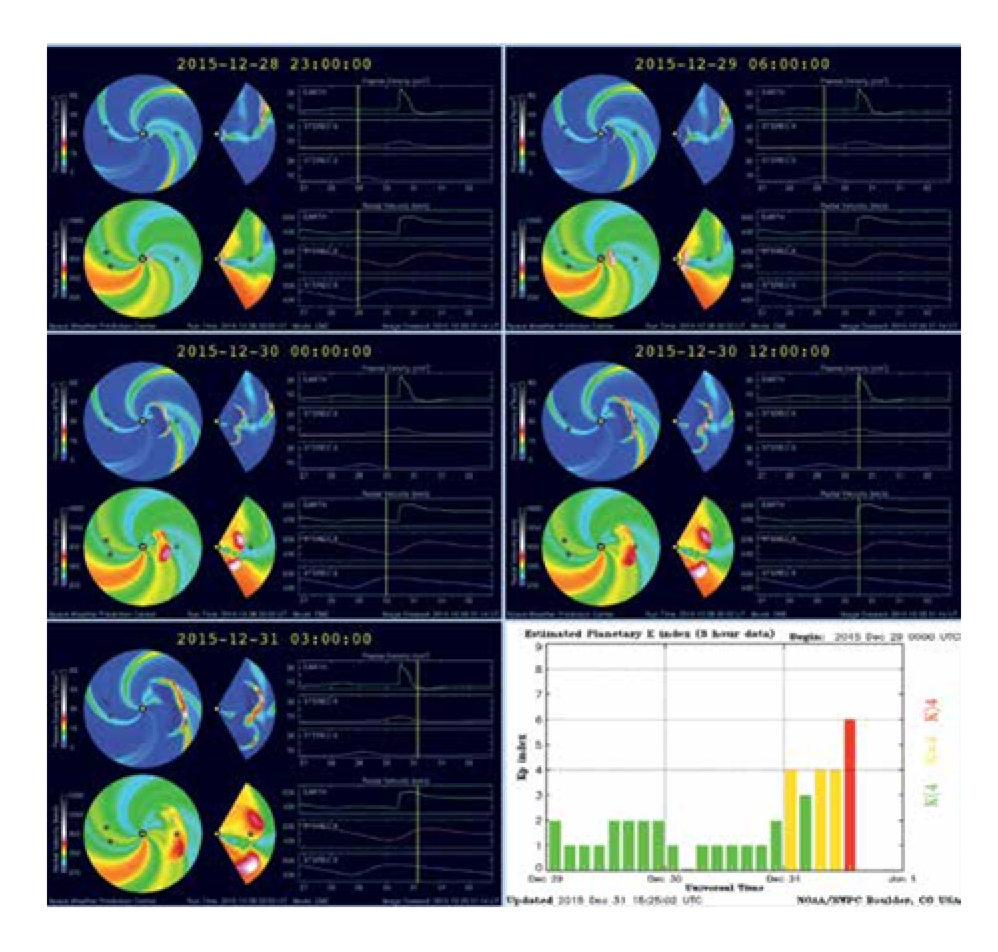


80- الأرضُ محاطةٌ بدِرعٍ مغناطيسيٍّ واقٍ يُسمَّى الغِلافَ المغناطيسي. تَسحبُ الرياحُ الشمسية مجالَ الغِلاف المغناطيسي إلى الخارج على هيئةِ ذيلٍ مغناطيسي طويلٍ على جانب الأرض الذي لا يُواجِه الشمس، والأحداث المغناطيسية الديناميكية على جانبِ التماس الأمامي - المُسمى الفاصل المغناطيسي - وفي الذيل، يُمكِنها العودة إلى الأرض، على امتدادِ خطوطِ المجال المغناطيسي نحوَ القُطبَيْن. ويشير المستطيلان الأحمران إلى الأماكن التي تبدأ منها هذه الاضطراباتُ قبلَ أن تنتشرَ إلى الأرض.

في هذا الشكل، يكونُ اتجاهُ المجالِ المغناطيسي القادمِ مُعاكِساً للمجالِ الأرضي، ويَنتجُ عن ذلك تحرُّرٌ قوي للطاقة المغناطيسية (في المنطقة المحدَّدة بمستطيلٍ مظلَّل باللون الأحمر) يُسَرِّع حركةَ الجُسيمات العالية الطاقة ويُرسِلها نحوَ الأرض. تقع أحداثُ إعادةِ اتصالٍ مُشابِهة في الغِلاف المغناطيسي، وهو مجالٌ مغناطيسي ممتدٌّ إلى الخارج، علـى جانبِ الأرض البعيد عن الرياح الشمسية الآتية من الشمس. وهنا أيضاً توجد منطقةٌ تتفاعلُ بها المجالاتُ المغناطيسية ذاتُ الاتجاهات المتعاكِسة وتُعاوِد الاتصال. وتُسرِّع أحداثُ إعادةِ الاتصال هذه الجُسيماتِ - وهي إلكترونات وبروتونات في الغالب - وتُعِيدها على امتداد المجال المغناطيسي كي تصطدمَ بالغِلاف الأيوني للأرض.

من أهمِّ الوظائف التي يَضطلعُ بها مجالُ الطقس الفضائي التنبُّؤ بالأحداث التي من المحتمَل أن تؤثِّرَ على الأرض مغناطيسيّاً. تُدير «الإدارة الوطنية للمحيطات والغِلاف الجـوي» (NOAA) خدمةَ الطقس الوطنيـة، وهـي المسؤولةُ أيضاً عـن وضـع هذه التنبُّؤات، وتنبُّؤاتها المعنية بالطقس الفضائي لها هيكلٌ مُشابِه، وتُصدِر تحذيراتٍ وتنبيهاتٍ اعتماداً على التنبُّؤات المأخوذة من نماذجِ الظروف المستقبلية. يوضِّح الشكل 81 أحدَ هذه التنبُّؤات، المأخوذَ من مركزِ تنبُّؤاتِ الطقس الفضائـي التابـع للإدارة. ويوضِّح تسلسُلُ الصورِ انبعاثاً كتلياً إكليلياً يغادر الشمسَ، ويشير إلـى أنه مـن المتوقَّعِ أن يَضربَ الأرضَ بعدَها بثلاثة أيام. وتوضِّح كلُّ لوحةٍ كثافةَ المادة المقذوفة في الجزء العلوي (اللون الأزرق غالباً)، وسرعةَ المادة في الجزء السفلي (اللون الأخضر المائل إلـى

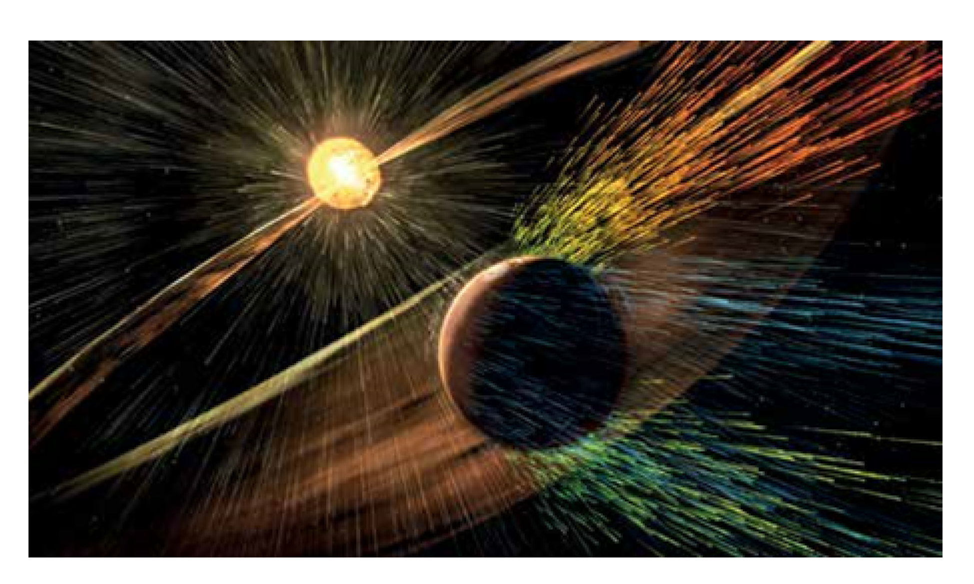
الصُفرة غالباً). علاوةً علـى ذلك، فــإن الحدَثَ مُبيَّنٌ من فـوق مستوى المســار الشمسي (على اليسار، دوائر تشبه دواليب الهواء) وعلى طول مستوى المسار الشمسي (منظر على شكل إسفين).



81- تُستخدم مجموعة الأجهزةِ الخاصة برصدِ الشمس والرياح الشمسية لبناءِ نَماذجَ من العواصف الشمسية من أجلِ التوصُّلِ إلى تنبُّؤاتٍ بالأحداث التي ستؤثِّر على الأرض. انظر النصَّ المرفَق للاطلاع على وصفٍ تفصيلي لهذه الأشكال وما تُظهِره.

توضِّح الصورةُ العلوية على اليسار الظروفَ السابقة لانبعاثٍ كتلي إكليلي، وتمثِّل البِنى الشبيهةُ بالمروحة الرياحَ المتدفِّقة إلى الخارج على نحوٍ منتظِمٍ للغاية، وتمثِّل الدائرةُ الصفراء بالمنتصفِ الشمسَ، والدائرةُ الخضراء ناحيةَ اليمين تمثل الأرضَ، بالإضافة إلى الانبعاثِ الكتلـي الإكليلي الذي غادَرَ الشمسَ لتوِّه متَّجِهاً إلى الأرض. توضِّح اللوحتان أعلى اليمين ومنتصف اليسار الانبعاثَ الكتلي الإكليلي المتمدِّد والمتطوّر أثناءَ تحرُّكِه خلال الفضاء الخارجي بين الشمس والأرض. وتوضِّح الصورةُ الموجودة في المنتصف جهة اليمين الانبعـاثَ الكتلـي الإكليلـي وهـو يَضربُ الأرضَ، وتَتناظَرُ مع الذُّروات في كلٍّ من الكثافةِ وسرعةِ الرياح الشمسية. وتوضِّح اللوحةُ الموجودة في الأسفلِ جهة اليسار الانبعاثَ الكتلي الإكليلي وهو يُواصِلُ المرورَ بجانـب الأرض نحوَ الكواكب الخارجية فـي المجموعة الشمسية. لاحِظِ الخطَّ الرأسي في الرسوماتِ

البيانية على اليمين بكل صورةٍ، الذي يشير إلى المكان الذي تقعُ فيه كلُّ صورةٍ على امتدادِ التسلسُل الزمني، ويشير أيضاً إلى كثافةِ الرياح الشمسية المحسوبة وسرعةِ الدُّنُوِّ من الأرض. هذه اللوحاتُ الخَمسُ هي تنبُّؤاتٌ أُجرِيت في اليوم الذي غادَرَ فيه الانبعاثُ الكتلي الإكليلي الشمسَ. وللمُقارَنة، توضِّح اللوحةُ الموجودة فـي الأسفل جهة اليمين بياناتِ الاضطرابِ المغناطيسي الفعلـي على الأرض، مُبيِّنةً وصولَ العاصفةِ المغناطيسية في وقتٍ متأخر من يوم 30 ديسمبر، أي بعد نحو نصفِ يومٍ من الموعد المتوقَّع.



82- اكتَشفتْ «بعثة الغِلاف الجوي والتطوُّر المتقلِّب للمريخ» Mars Atmosphere and Volatile Evolution (مافن MAVN) أن تدفُّقاتِ الرياح الشمسية تجرِّد المريخَ من غِلافه الجوي، وأن الانبعاثات الكتلية الإكليلية تُسهِم بشدة في زيادةِ هذا المعدل عند حدوثها. وهذه الصورةُ التخيُّلية نوعاً ما توضِّح حدَثاً كهذا يضربُ المريخَ ويُطِيح بالذراتِ المتبقية من غِلافه الجوي الرقيق. من المرجَّح أنّ المريخ كان يمتلك مجالاً مغناطيسياً واقياً في الماضي البعيد، لكنه لم يَعُد له وجودٌ وأصبح الغِلافُ الجوي مكشوفاً ومُعرَّضاً بشكلٍ مباشِر للأحداث المدمِّرة الآتية من الشمس.

تملكُ الإدارةُ الوطنيـة للمحيطات والغِلاف الجـوي مجموعةً من الأقمار الاصطناعية الثابتة بالنسبة إلى الأرض، وعلى رأس هذه الأقمارِ المرتَّبةِ أبجدياً «قمر الرصد البيئي العامل ذو المدار الثابت»، R -(GOES). أُطلِق هذا القمرُ فـي نهاية عام 2016، حاملاً كاميرا تصويرٍ بالأشعة فوق البنفسجية لرصْدِ الشمس بستةِ مُرشحاتٍ فوق بنفسجية بفاصلٍ قَدْرُه أربعُ دقائقَ، قائمة على مجموعةِ مرشحاتِ مرصد ديناميكا الشمس المكوَّنة من ثمانيةِ مُرشحاتٍ. (وعلى أي حال، بالرغم من أن كاميرات الأقمار الاصطناعية الثابتة الرئيسة مُوجَّهةٌ صوبَ الأرض، فإن الألواحَ الشمسية مُوجَّهةٌ صوبَ الشمس؛ ومن ثَم فإنها بمنزلةِ منصةٍ جيدة لتثبيت تلسكوبٍ شمسي). تمتلكُ كاميرا التصوير بالأشعة فوق البنفسجية القصوى مجالاً للرؤية أكبرَ قليلاً من ذلك الذي يمتلكه مرصد

ديناميكا الشمس، لكن دِقةَ صورتها أقلُّ بمعاملٍ قَدْرُه 4. ونأملُ أن يصلَ عُمرُها الافتراضي إلى عشرين عاماً.

تُواصِلُ الانبعاثاتُ الكتلية الإكليلية المرورَ بجوارِ مدارِ الأرض، والارتطامَ بأجرامٍ أخرى في المجموعة الشمسية، من بينها أيُّ كواكبَ يَتصادفُ وجودُها في مَسارها. أُطلِقت بعثةُ الغِلاف الجوي والتطوُّر المتقلب للمريخ (مافن) في الثامن عشر من نوفمبر عام 2013، ودخلتِ المدارَ المحيطَ بالمريخ في الحادي والعشرين من سبتمبر عام 2014، بهدفِ دراسةِ تفاعُلِ الإشعاع الشمسي والرياح الشمسية مع الغِلاف الجوي العلوي للمريخ. وتشير الأدلةُ المتاحة من الاستكشافات السابقة للمريخ إلى أن الكوكبَ كان له غِلافٌ جوي سميكٌ في الماضي البعيد، وأنه كان دافِئاً بما يكفي ليَدعمَ وجودَ ماءٍ سائل على سطْحِه. ومن المرجّح امتلاكُ المريخ أيضاً مجالاً مغناطيسياً واقياً منذ مليارات السنين، لكنْ بسببِ برودةِ لُبِّه توقَّفَ الدينامو المغناطيسيُّ الخاصُّ به، ولم يَعُد ثَمة وجودٌ لأيِّ مجالٍ مغناطيسي حول المريخ. وتوضِّح قياساتُ «مافن» أن الرياحَ الشمسية تجرِّد الغِلافَ الجوي الرقيق المتبقِّي للمريخ تدريجياً، وأن الانبعاثاتِ الكتليةَ الإكليلية العابرة تعزِّز فقدانَ الغِلاف الجوي بما تسبِّبه من انفجاراتٍ حادَّةٍ مُوجزة خلال عبورها. ويبدو أن فقدانَ الغِلاف الجوي نتيجةَ الأحداثِ الشمسية كان هو السببُ الرئيس في التغيرات التي شهدها مناخ المريخ.

إلى أيِّ مدى تمتدُّ هذه التأثيراتُ الشمسية بعيداً عن الشمس؟ تعملُ الرياحُ الشمسية والانبعاثات الكتلية الشمسية معاً على دفْعِ الوسطِ بين النجمي المحلي - وهو المادة الرقيقة التي تَملأُ الفضاءَ بين النجوم في مَجَرَّتنا - وتحفر تجويفاً تستقرُّ فيه مجموعتنا الشمسية. هذا الحيِّز، ونعني محيطَ تأثيرِ الشمس، يُسمَّى الغِلاف الشمسي، وهو يحدِّد مدى تأثيرات الرياح الشمسية.

الخاتمة:
الغلاف الشمسي

في 25 أغسطس 2012، كانت «فوياجر 1» Voyager 1 أولَ مَرْكبةٍ فضائية من صُنع الإنسان تغادر المجموعة الشمسية، وتحلِّق إلى الفضاء بين النجمي. وأُطلِقت المَرْكبةُ من قاعدةِ كيب كانافيرال في 5 سبتمبر 1977، وكانت مهمتُها الأساسية التحليقَ على مقربةٍ من كوكبَيْ زحل والمشتري، والقمر تيتان التابع لزحل.[26] وصلت المَرْكبةُ إلى كوكب المشتري فـي 5 مارس 1979، والْتَقطتْ صــوراً تفصيليةً للكوكب وللعديد من أقماره، وكان الحدَثَ الأبرزَ رصْدُها براكينَ نَشِطةً على القمر آيو، قمر المشتري. وبمُعاوَنةِ مُناوَرةِ الجاذبية المساعِدة، انطلقتِ المركبةُ نحوَ زحل، ووصلتْ لأقربِ نقطةٍ منه في 12 نوفمبر 1980. ثم تابَعتْ رحلتها إلى خارج المجموعة الشمسية، وتبعد حالياً نحو 20 مليار كيلومتر عن الشمس.

رأينا كيف يمتدُّ التأثيرُ الشمسي متجاوزاً الأرضَ وكوكبَيْ زحل والمشتري الغازيَّيْن الكبيرَيْن، وإلى أبعدَ من جميع كواكب المجموعة الشمسية المعروفة. ولكن إلى أيِّ مدى تمتد سطوةُ نطاق التأثير، إذا جـاز لنـا استعارة أحد المصطلحات السياسية؟ هل هنـاك «غِلاف شمسي»؟ هل تتلاشـى الانبعاثاتُ الشمسية تدريجياً دونَ نقطةِ نهايةٍ واضحة، أمْ أنَّ هناك نوعاً من الحدود الواضحة بين مجموعتنا الشمسية والفضاء الكوكبي؟ ربما يَخطرُ للمرء أن الرياحَ الشمسية تَسلكُ سلوكَ الضوء فتنتشرُ تدريجياً في جميعِ الاتجاهات من الشمس، وتقلُّ شِدتُها بانتشارها على مساحةٍ أكبرَ فأكبر. إذا نظرنا إلى الشمسِ من بعيدٍ فإنها تبدو أصغرَ وأقلَّ سطوعاً كلما ابتعدنا عنها إلى أن تصبحَ نقطةَ ضوءٍ صغيرةً شبيهةً بأي نَجْمٍ آخَر، وفي النهاية تصبح خافتةً جداً بحيث تتعذَّر رؤيتُها بالعين المجردة. وتَحدُث هذه التغيراتُ بسلاسةٍ ودونَ حدودٍ أو انقطاعٍ واضح. وينطبق الأمرُ ذاته على جاذبية الشمس؛ إذ تمتدُّ إلى الخارج وتتلاشى بسلاسةٍ، وتَضعفُ تدريجياً، وتمتدُّ نظرياً إلى ما لا نهاية، لكنها عملياً تصبح شبهَ منعدمةٍ على مسافة 3.6 سنوات ضوئية تقريباً.

لكن الرياحَ الشمسية تَسلكُ سلوكاً مختلفاً. فهناك وسَطٌ بين نَجْمي يتكوَّن من غازٍ ذي كثافةٍ شديدةِ الانخفاض بين النجوم، وتقلُّ كثافتُه عن كثافةِ غِلافنا الجـوي الأرضي بمليارات المـرات. وبالقـرب مـن الشمس، تكون الرياحُ الشمسية المتدفِّقةُ قويةً بالقدْرِ الذي يسمح بدفْعِ هذا الغاز المحيط، ومن ثَم تُشكل مساحة كبيرة من الفضاء مليئة بمادة الإكليل الشمسي المتمدِّدة والانبعاثات الأخرى للبلازما

المُمغنطة الساخنة التي تَندلعُ بين الحينِ والآخَر. ولكن، تَضعفُ قوةُ هذه الرياح في النهاية إلى أن تَعجزَ عن دفعِ المواد بين النَّجْمية بعيداً، وتبيَّنَ أن هناك حداً يُمكِننا بعدَه القولُ إن تأثيرَ الرياح قد توقَّف. ونُطلِقَ على هذا الحد اسمَ حافةِ الغِلاف الشمسي heliopause؛ إذ تَعْني كلمة «pause» ببساطةٍ النهايةَ.

تنبَّأ يوجين باركر بوجودِ الحد الخارجي لتأثيرِ الرياح الشمسية عندما صاغَ نظريتَه عن الرياح الشمسية، وأشار إلى أنها ستتمدَّدُ بسرعةٍ تَفُوق سرعةَ الصوتِ عبر الفضاء الكوكبي. وبالابتعاد عن الشمس أكثرَ فأكثر تَخفُتُ هذه الرياحُ تدريجياً إلى أن تقلَّ سرعتُها عن سرعة الصوت. يحدثُ الانتقالُ عبرَ تأثيرٍ خاص بالانتشار بسرعةٍ تتجاوز سرعةَ الصوت. وينصُّ المبدأ الأساسي لأيِّ وسطٍ على أن الاضطراباتِ تنتقل بسرعةٍ مُعيَّنة تحدِّدها قُدرةُ الوسَطِ على التعافي من هذا الاضطراب. فإذا حاوَلتَ أن تضغطَ الهواءَ أو زنبركاً أو شيئاً مَرِناً مماثِلاً، فإنه سيعود إلى وضْعِه الأول، وستحدثُ هذه الاستجابةُ بسرعةٍ تعتمد على طبيعةِ الوسط المضطرِب. فالمادةُ الليّنة الشديدةُ المرونة ستستجيب ببطء؛ لذلك ينتقل الاضطراب ببطء. أمَّا المادةُ الشديدة الصلابة، كالقضيب المعدني، فإنها تفتقر إلى المرونة؛ لذلك ينتقلُ الاضطرابُ بسرعةٍ كبيرة جداً. ونطلقُ على هذه السرعةِ اسمَ «سرعة الصوت»، على الرغم من أن استخدامَ هذا الوصفِ يتجاوزُ وصْفَ الموجاتِ الصوتية فقط، مثل وصْفِ النوع الأكثر شيوعاً من الموجات الناتجة عن انضغاطِ وسَطٍ مَرِن.

ماذا يحدث عندما يتسبَّب جسمٌ في حدوثِ اضطرابٍ عند مرورِه عبرَ أحدِ الأوساط؟ الطائرةُ على سبيل المثال تفعل هذا، وتدفعُ الهواءَ بعيداً عن مسارِها في أثناء تحليقها. تكون الأمورُ على ما يرام ما دامَتِ الطائرة تحلِّق بسرعةٍ مناسبة تَسمحُ بإزاحة الهواء بعيداً. وينتقل الاضطرابُ الذي أحدثَتْه الطائرة بسرعةِ الصوت - وفي هذه الحالة تكون السرعةُ فعلياً سرعةَ الصوت - ويندفع بسرعةٍ أمامَ الطائرة. ولكن إذا حلَّقتِ الطائرةُ بسرعةٍ تتجاوز سرعةَ الصوت؛ فلن يتمكَّن الهواء من الاندفاع بعيداً بالسرعة الكافية. تضغط الطائرةُ الهواءَ وتجعله يتكدَّس على هيئةِ جدارٍ عالي الكثافة. ينتقل هذا الجدارُ المسمى «صدر الموجة الصدمية» بعيداً إلى جانب الطائرة وخلفها بسرعة الصوت. وعندما تحلِّق فوقَنا نسمعُ هذه الموجةَ المضغوطة تمر بنا على هيئةِ دَوِي اختراقِ حاجزِ الصوت.



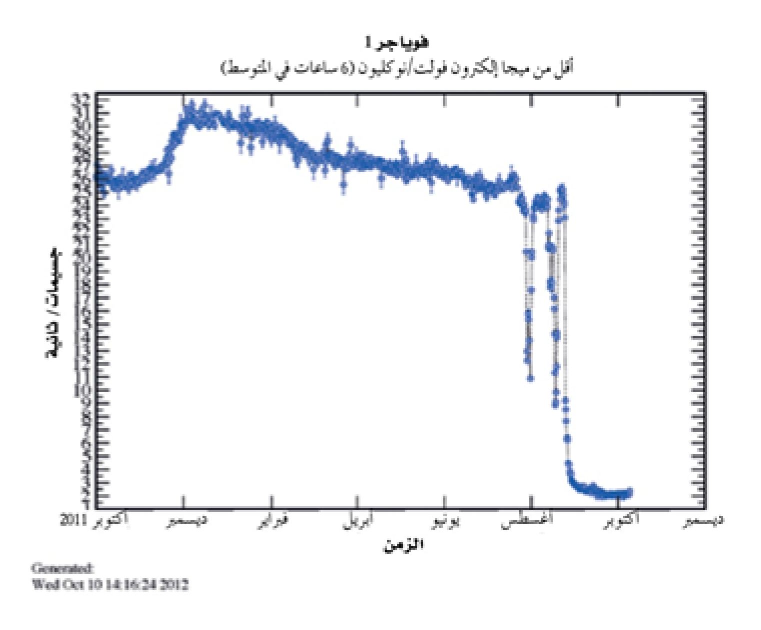
83- ذيل المذنَّبِ ماكنوت (McNaught) المرصود من المَرْكبة الفضائية «ستيريو» في 18 يناير 2007. الشكلُ العام للذيل ناتجٌ عن الغبارِ الذي يُخلِّفه المذنب وراءَه في أثناء تحركه في مداره حول الشمس. لكن هذه الخطوطَ ناتجةٌ عن الجُسيماتِ المتأيِّنة الموجودة في ذيل المذنب، وتفاعُلِها مع الرياح الشمسية المُمغنطة المتدفِّقة، وهي تتَّجِه بعيداً عن الشمس التي تقع يميناً خارجَ إطارِ هذه الصورة. أمَّا النقطتان الساطعتان اللتان تُشبِهان النجومَ وبهما خطَّان رأسيَّان في منتصفِ يسارِ الصورة ويمينِها، فهما كوكبا الزُّهَرة وعُطارد على الترتيب. وهما شديدا السطوعِ لدرجة أن ضوءهما يغمر الكاميرا الحسَّاسة المستخدَمة في التقاط هذه الصورة.

وتَحدُث ظاهرةٌ مُشابِهة عند انتشار الرياح الشمسية التي تَفُوق سرعتُها سرعةَ الصوت في الفضاء بين النجمي. في النهاية، تنتقل تلك الرياحُ المتمددة إلى سرعةٍ تقل عن سرعة الصوت، وينعكسُ الوضع، فتُعِيق الرياحُ التي لها سرعةٌ دونَ سرعةِ الصوتِ الرياحَ الأخرى التي تَفُوق سرعتُها سرعةَ الصوت، ومن جديدٍ يتشكَّل جدارٌ عالي الكثافة. يسبِّب هذا الانتقالُ موجةً صدمية، في هذه الحالة تكون صدمةً ثابتة؛ أيْ أنها صدمةٌ تكاد تكون ثابتةً في المكان نفسِه في جميع الأوقات. ونصِفُها بأنها «تكاد» تكون ثابتةً لأن الرياحَ الشمسية المتمدِّدة متغيِّرة؛ لذلك يُمكِن أن يحدثَ الانتقالُ في موضعٍ أقربَ قليلاً أو أبعدَ قليلاً، اعتماداً على سرعةِ تدفُّقِها إلى الخارج. ومع ذلك، يَحدثُ في جميعِ الأرجاء المحيطة بالشمس انتقالٌ مُفاجِئٌ ومحدَّدٌ بوضوح يُسمَّى «صدمة النهاية» التي يُمكِننا تسميتُها مدى تأثير الرياح الشمسية. شُوهِدت المَرْكبتان الفضائيتان فوياجر 1 و2 وهما تَجتازان صدمةَ النهاية. ويُعتقَد أن فوياجر 1 اجتازتها في ديسمبر 2004، على مسافةِ

94 وَحْدةً فلكية من الشمس، ويبدو أن فوياجر 2 اجتازتها في مايو 2006، على مسافةِ 76 وَحْدةً فلكية.

حافة الغِلاف الشمسي

لا تمثِّلُ صدمةُ النهاية سوى أحد الحدودِ الفاصلة التي تميِّز حدَّ التأثير الشمسي. ربما حدث تراجُعٌ في سرعة الرياح الشمسية، لكن تدفُّقَها إلى الخارج ما زال مستمراً، وما زال ضغْطُها كبيراً بما يكفي لدفْعِ الغاز بين النَّجْمي إلى الخلف. وبعد صدمةِ النهاية تتفاعلُ الرياحُ الشمسية مع الغازِ بين النَّجْمي في منطقةٍ دوَّامية مضطربة يُطلَق عليها اسم «الغشاء الشمسي». وفي النهاية، توجدُ منطقةٌ أخرى أبعد، يصبح تدفُّقُ الرياح الشمسية خلالَها ضعيفاً بحيث تَعجزُ عن دفْعِ الوسْطِ بين النَّجْمي، وتصبح في وضع السكون. وبتجاوُز حافةِ هذا الغِلاف الشمسي، يُمكِننا فعلياً القولُ إننا خارج المجموعة الشمسية وفي الفضاء بين النَّجْمي.



84- يُظهِر هذا المخطَّطُ البياني عددَ جُسيماتِ الأشعة الكونية لكل ثانية، التي رصَدَتْها المَرْكبةُ فوياجر 1 في الفترة من أكتوبر 2011 وحتى أكتوبر 2012. يبدأ المعدلُ المرصود في التغيُّر بدءاً من أغسطس 2012، ويستقرُّ أخيراً بعد انخفاضٍ حاد في عددِ جُسيمات الأشعة الكونية الشمسية بحلول سبتمبر من ذلك العام. يُعَد هذا الانتقالُ إحدى سبل تحديدِ تجاوُزِ المدى الخارجي لتأثير الشمس.

في واحدٍ من أكثرِ الإنجازات إثارةً للذهول في تاريخ رحلات الفضاء، يبدو أن المَرْكبةَ فوياجر 1 اجتازَتِ المنطقةَ المضطربة المُتنبَّأ بها لعدةِ سنواتٍ، ثم اجتازتِ الحدودَ الخارجية النهائية اعتباراً من 25 أغسطس 2012 (الشكل 84)، وهو ما يتَّضِح من الانخفاضِ المفاجئ في عدد الأشعة الكونية. لم تَعُد هذه الجُسيماتُ العاليةُ الطاقةِ آتيةً من الشمس، وإنما يبدو أنها صادرةٌ من منطقةٍ خارجَ المجموعة الشمسية. وبدلاً من الجُسيماتِ العاليةِ الطاقة الآتية من الشمس - الأشعة الكونية الشمسية - نرى الآن فئةً مختلفة من الجُسيماتِ العاليةِ الطاقة تنتشرُ في الفضاء بين النَّجْمي؛ ألا وهي الأشعةُ الكونية المَجَرِّيَّة.

التوغُّل في الوسَطِ بين النَّجْمي

تتحرَّك الشمس، بمجالِها المغناطيسي، ورياحِها الشمسية المتدفِّقة، وجميع كواكبها وأَجْرامها الصغيرة التي لا حصرَ لها، عبرَ سحابةٍ من الغاز والغبار تُعرَف باسمِ الوسَطِ بين النَّجْمي. وتواجِهُ الرياحُ الشمسية المتدفِّقة في النهاية هذا الوسَطَ المحيط، وينبغي من الناحية النظرية أن يحدُثَ انتقالٌ بين الاثنَيْن. ولفَهْمِ الشكل المحتمَل لمجموعتنا الشمسية عند النظر إليها من نَجْمٍ آخَرَ بعيد، يُمكِننا النظرُ إلى نجومٍ أخرى تتحرَّك عبرَ وسَطِها بين النَّجْمي. تقع واحدةٌ من أشهرِ هذه المناطق في كوكبة الجبار (Orion)؛ إذ نرى بوضوحٍ التفاعُلَ بين النجومِ اليافعة والوسَطِ بين النَّجْمي المحيطِ وهي تتوغَّلُ فيه (الشكل 85).



85- هذه البِنيةُ القوسية الرائعة هي في الواقع صدمةٌ قوسية تمتدُّ لمسافةٍ تُناهِز نصفَ سنةٍ ضوئية، ونشأتْ نتيجةَ اصطدامِ الرياح المنبعثة من النَّجْم الحديث أوريونس بسديم الجبار. هذه الصورةُ الملونة المركبة التي الْتَقطَها تلسكوب هابل الفضائي في عام 1995، تشكِّل جزءاً من صورةٍ مُجمَّعة أكبرَ للسديم العظيم الذي يغطِّي كوكبة الجبار.

هناك بعضُ التساؤلات الآن حولَ ما إذا كانتِ الرياحُ الصادرة عن الشمس تُنتِجُ بِنيةً مذهلةً على شكلِ قوس، تُعرَف باسمِ الصدمة القوسية، أم لا، ولكن من المؤكَّد أننا نرى تشكُّلَ هذه البِنى حول النجوم الأخرى، خاصةً في اتجاهِ حركتها نسبةً إلى الوسَطِ بين النَّجْمي المحيط. ولتوضيحِ مكاننا في المَجَرَّة نختتم بهذه الصورة لنَجْمٍ في سديم الجبار، وهو النَّجْمُ أوريونس، التقطها التلسكوب هابل. يحدث انحرافٌ في السديم، ويُنتِجِ النَّجْمُ الحديث أوريونس رياحاً نجميةً نَشِطة تصطدمُ بالغاز المحيط الأبطأ وتشكِّل صدمة. ويُمكِن رؤيةُ صدمةٍ قوسية صغيرة أخرى أمامَ نَجْمٍ خافتٍ يقع أعلى اليمين. نحن بالتأكيد في وضعٍ مُماثِل، بعيداً عن أقربِ جيراننا، ننجرفُ عبرَ دوَّامات البلازما بين النجمية، ونعيشُ على كرةٍ صخرية صغيرة مُرافِقة للكرة المتوهِّجة التي نسمِّيها الشمس.

الملحق 1:
الرصد الآمِن للشمس

يَفُوق سطوعُ الشمس سطوعَ البدر المكتمِل مليونَ مرة، والشمسُ شديدةُ السطوع إلى الحد الذي يجعل النظرَ إليها بالعين المجردة غيرَ آمِن. وإذا حدَّقت فيها لثوانٍ معدودة، فقد يَلحقُ بعينَيْك ضررٌ دائم. وبالتأكيد لا يُنصح باستخدامِ المناظير أو التلسكوب للنظر إلى الشمس مباشَرةً، إلا في وجودِ مرشحٍ مناسب. والأجهزةُ البصرية التي تَستقبلُ ضوءَ الشمسِ المركَّزَ دونَ وجودِ مرشحاتٍ مناسبةٍ، قد تتسبَّب سريعاً في حدوثِ حروقٍ في شبكية العين.

لا تحتوي العينُ (والشبكية على وجه الخصوص) على مستشعراتٍ للألم؛ لذا لن تَشعُرَ بألمٍ ينبّهك إلى أنك تُلحقُ ضرراً بعينَيْك. قد يتسبَّب تكوُّنُ صورةِ الشمس على شبكيةِ العين في حرْقِها؛ ممَّا يؤدي إلى تلفِ أو تدميرِ الخلايا العصوية والخلايا المخروطيّة (انظر الفصل الرابع). وفي بعض الأحيان، يُلاحِظ أطباءُ العيون وجودَ حرْقٍ في الشبكية على شكلِ هلالٍ يُطابِق شكلَ هلالِ الكسوف الذي رصَدَه الشخص.

لا يكفي ارتداءُ النظَّاراتِ الشمسية عند النظر مباشَرةً إلى الشمس؛ إذ إنها تُخفضُ شدةَ الإشعاع الشمسي بمعاملٍ قَدْرُه 2 أو نحو ذلك. إن ما تحتاجه فعلياً هو «نظَّارات الكسوف»، أو «نظَّارات الكسوف الجزئي» علـى وجـهِ الدقة، أو «نظَّارات مُشاهَدةِ قُرصِ الشمـس الكامل». ولا تتجاوز تكلفةُ هذه النظارات دولاراً أو جنيهاً إسترلينياً، ويكون السعر أقلَّ عند شراءِ كمياتٍ منها. هذه النظاراتُ مَطْليةٌ بطبقةِ بوليمر داكنةِ اللون (وهي داكنة بسببِ جزيئاتِ الكربون المعلَّقة)، أو المايلر mylar المَطْلي بطبقةِ ألومنيوم (لا يُقصَد هنا العلامة التجارية مايلر «Mylar») لامتصاصِ جميعِ الأشعة المنبعثة من الشمس، باستثناءِ جزءٍ واحد من المئة ألف. ربما يُتاح رقمُ اعتمادٍ تُصدِره المنظمةُ الدولية للمعايير القياسية (ISO)، ويُمكِنك اختيارُ قبولِ المرشحات التي تمتلك تلك الشهادة القياسية فقط التي تأتي مع شعار «سي إي» CE، لقوانين الجودة والأمن والسلامة في دول الاتحاد الأوروبي، والشهادة المرتقبة اعتباراً من 2016 هي أيزو 12312- 2. إذا أبعدْتَ النظَّاراتِ عن عينَيْك وقرَّبتها باتجاه الشمس، فسيُمكِنك ملاحظةُ ما إذا كان بها ثقوبٌ من أي حجم. ارفضِ النظاراتِ إذا رأيتَ نقاطَ ضوءٍ ساطعةً تَنفُذ عبْرَها (الشكل 86).

قديماً، استُخدِم الزجـاجُ المدخـن لرصـدِ الشمـس، ويُمكِنك الحصول عليه ببساطة بتغطيةِ لوحٍ زجاجـي بالسُخام المنبعث من اللهب، لكنَّ هذه الطِّلاءاتِ تكون مُتباينةً في توزيعها وتَسهُل إزالتها عَرَضاً؛ لذلك تُعَد الآن غيرَ آمِنة. وبالمثل، فإن النظرَ عبرَ الطِّلاءاتِ الموجودة في الأقراص المدمجة وأقراص الفيديو الرقمية يُمكِن أن يقلِّلَ من ضوءِ الشمس الوارد إلى مستوى مقبول، ولكن لن يتمكَّنَ غيرُ الخبراء من تقديرِ متى يكون امتصاص/انعكاس ضوء الشمس الوارد كافياً، وربما ينظر المبتدئون عبرَ فجوة تلك الأقراص، مما يَسمَحُ بوصولِ الضوء غير المرشح إليهم.



86- مجموعةٌ حديثة من نظَّارات الكسوف.

هناك نصيحةٌ أخرى معتادة؛ ألا وهي استخدامُ النظَّارة رقم 14 المستخدَمة فـي لحام الزجاج. النظارةُ رقم 12 ستَفِي بالغرضِ حقاً، لكنها ستعطي صورةً أكثرَ سطوعاً للشمس، وهي متاحةٌ بسهولةٍ أكبر. لكن استخدامَ نظَّاراتِ الكسوف يكون منطقياً أكثر، فهي متوفرةٌ بسهولةٍ وزهيدةُ الثمن. علاوة على ذلك، فإن نظاراتِ لحامِ الزجاج تعطي صورةً مائلة إلـى الخُضْرة لا يفضِّلها بعضُ الناس مُقارَنةً بالصورة البرتقالية الناتجة عن استخدامِ عدةِ أنواعٍ أخرى من المرشحات.

عـادةً ما تمتصُّ الأفلامُ الفوتوغرافيـة الضبابية وأفلامُ الأبيض والأسود المعرضة للضوء، أو فيلم الأشعة السينية (انظر عبرَ الأجزاءِ الكثيفة وليس الأجزاء الشفَّافة الناتجة عن وجودُ العظام!) قَدْراً كافياً من الضوء يَجعل منها مرشحاً مناسباً، ولكن في يومنا هذا، يَندر وجودُ فيلم التصوير الأبيض والأسود العتيق. ويجب عدمُ استخدامِ الفيلم الملوَّن لأنه لا يمتصُّ الأشعةَ تحت الحمراء التي تجعل فيلم الأبيض والأسود آمِناً.

نستخدم مصطلحَ «الكثافـة المحايـدة» للإشـارة إلـى مِقياسٍ لوغاريتميٍّ لإضعاف الأشعةِ عبرَ نطاقٍ طيفي واسع، لكن الكثافةَ المحايِدة لا تَعْني عدمَ وجودِ «تسرُّب للأشعة تحـت الحمراء»؛ فمن الممكن أن يمرَّ قدْرٌ من الإشعاع غير المرئـي يكون كافياً لإلحاق الضـررِ بالعين. وعندمـا تبلـغ قيمةُ الكثافةِ المحايِدة صِفراً، فهذا يعني عدمَ حدوثِ إضعاف؛ أيْ أن نسبةَ انتقالِ الضوء تبلغ 100%. وعندما تكون قيمتها 1، فهذا يعني أن قوةَ الإضعاف تساوي واحداً من عشرة، أيْ أن نسبةَ انتقالِ الضوء تساوي 10%. وعندما تكون قيمتها 2، فهذا يعنـي انتقالَ الضوء بنسبة 1%. ولكي تَحْظى برؤيةٍ آمِنة للشمس، يُوصي الخبيرُ الرئيس في مجال المرشحات الشمسية، بي رالف تشو B. Ralph Chou الأستاذُ الفخري بجامعة ووترلو في كندا، بكثافةٍ لا تقلُّ عن 4.5 في نطاق الضوء المرئي، ونحو 2.3 في نطاق الأشعة تحت الحمراء؛ أيْ أقل من 0.003% في

الضوء المرئي، و0.5% في نطاق الأشعة تحت الحمراء. يتضمَّن عمل تشو (انظر الرابط أدناه) صفحةً من الرسوم البيانية لنقلِ المرشحاتِ المختلفة في شكلِ دالة للطول الموجي.

للاستخدام مع التلسكوب، يُفضِّل العديدُ من الأشخاص استخدامَ مرشحاتِ الكثافة المحايِدة المصنوعة من ركيزةٍ زجاجية فوقَها طبقةٌ مترسِّبة من الكروم. بالنسبة للتلسكوبات (أو المناظير)، يجب استخدامُ المرشحات دائماً في واجهةِ الجهاز ليخضعَ ضوءُ الشمس إلى الترشيحِ قبل نَفاذِه إلى العناصر البصرية. وبهذه الطريقةِ لا يتركَّزُ ضوءُ الشمس بالكامل على المرشح، ممَّا قد يمثِّل خطراً، بل قد يؤدي أيضاً إلى تصدُّع المرشح أو العنصر البصري. ومن المُمكِن شراءُ مرشحاتٍ ذاتِ كثافةٍ مُحايِدة بفتحةٍ كاملة.

يستخدم بعضُ الهُواة المتمرِّسين مرشحاتٍ خاصةً تسمح بمرورِ الخط الطيفي الأحمر للهيدروجين، أو الخط الطيفي فوق البنفسجي للكالسيوم المتأيِّن. تُظهِر هذه المرشحاتُ بِنْيةَ الغِلاف اللوني. ومن ناحيةٍ أخرى، تُظهِر مرشحاتُ الكثافة المحايِدة طبقةَ الغِلاف الضوئي للغِلاف الجوي الشمسي، ويشمل ذلك البُقَع الشمسية.

بعد قليلٍ من التدريب، يُمكِنك أن تطلبَ نظاراتِ مُشاهَدةِ كسوف الشمس من مختلِفِ الموزِّدين، وخاصةً:

في أوروبا: شركة «أسيست بوينت ليمتد»، Assistpoint, Ltd, www.eclipseglasses.co.uk في أمريكا: «ثاوزند أوكس أوبتيكال»، Thousand Oaks Optical, www.thousandoaksoptical.com «رينبو سيمفوني»، Rainbow Symphony،www.rainbowsymphony.com «أمريكان بيبر أوبتكس»، American Paper Optics، www.eclipseglasses.com (ولكن لا تَخلطْ بين النظاراتِ الثلاثيةِ الأبعاد ذات اللون الأحمر/الأخضر، والنظاراتِ الشمسية ذات الامتصاص الكامل).

«بـادر بلانتيريم»، Baader Planetarium، (ألمانيا)، www.baader-planetarium.com/.

للحصول على معلوماتٍ عن الأمان والأيزو (سرعة الفيلم)، يُمكِنك تصفُّحُ الموقع الإلكتروني: www. eclipseglasses.com/pages/safety.

يُمكِنك مُشاهَدةُ معرض للنظارات الشمسية عبر الإنترنت، عبر الموقع:

http://astronomy. williams.edu/hopkins- observatory/eclipse- viewers,

ويشمل ذلك عرضَ مثالٍ لنظارةٍ يعود تاريخُها للكسوف الشمسي الذي شَهِدته لندن عامَ 1790 (الشكل 87).



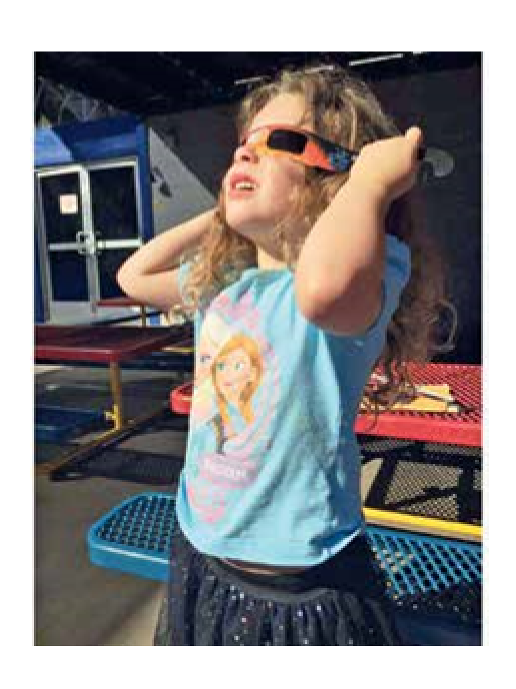
87- مِنْظارُ كسوفٍ شمسي ذو حاملٍ من العاج، يعود تاريخُه إلى الكسوف الشمسي الذي شهِدَتْه لندن في عام 1790. المادةُ المصنوع منها المرشح ليست واضحةً.

وتُعرَض مجموعةٌ مختارة أيضاً من المرشحات على الطبيعة، في متحف ميلهام للفلك فـي مرصد هوبكنز التابع لكلية وليامز فـي وليامز تاون، ماساتشوستس.

بالنسبةِ للفصولِ المدرسية، ربما تفضّل شراءَ لوحٍ مربع مساحتُه 50 سم أو نحو ذلك، ووضْعَه داخلَ إطارٍ من الورق المقوَّى، ليتمكَّنَ التلاميذُ الصغار من الوقوفِ خلفَه بسهولةٍ (الشكل 88).

يُمكِنك أيضاً استعراضُ القسمِ الخاص بسلامةِ العين والمرشحاتِ الشمسية على الموقع الإلكتروني: www.eclipses.Info، الخاص بفريقِ العمل المَعْني بالكسوف الشمسي، والتابع للاتحاد الفلكي الدولي.

http://uwaterloo.ca/optometry- vision- science/ people- profiles/b- ralph- chou www.skyandtelescope.com/observing/solar- filter- safety





88- مشاهدةٌ آمِنة للكسوف، باستخدامِ نظاراتٍ فردية (الصورة العلوية)، أو لوح كبير مصنوع من مادةٍ مرشحة (الصورة السفلية).

الملحق 2:
رَصْد الشمس بالنسبة للهُواة

لتتمكَّنَ من مُشاهَدةِ البُقَع الشمسية بأمان، ستحتاجُ إلى استخدامِ تلسكوبٍ به مرشحٌ مناسِبٌ في واجهتِه الأمامية (يُمكِن أن تتحطَّمَ «المرشحاتُ الشمسية» الموضوعة في الجهة الخلفية بسببِ شدةِ الأشعة الشمسية المركَّزة؛ لذا فإنها لا تُعَد آمِنةً). تُناسِبُ مرشحاتُ «الكثافة المحايِدة» واجهةَ أيِّ تلسكوب، وهي متوفرة بسعر 50 دولاراً/جنيهاً إسترلينياً. وهي تُضعِف جميعَ ألوانِ الضوء بشكلٍ متساوٍ إلى حدٍّ ما، لإنتاجِ صورةٍ بيضاء، أو تمرِّر القليلَ من اللون البرتقالي لتُعطِي صورةً برتقالية مُبهِجة. يُعرَف التصميمُ المدمج، ذو المسارِ البصري المَطْوي باستخدامِ المرايا لجعْلِ الجهاز صغيراً ويُمكِن حمْلُه، باسم «المراقِب الشمسي»، وهو متاحٌ للشراء عبر المصادرِ الموضَّحة أدناه مقابلَ بضعِ مئات من الجنيهات أو الدولارات. ولا تَنْسَ اقتناءَ جهازِ تحديدِ المجال الشمسي، وكلاهما زهيدا الثمن، وهناك إصدارٌ مصنوعٌ من الورق المقوَّى وآخَرُ أحدثُ مصنوع من الخشب، وهو صناعةٌ فرنسية، ومتاحٌ للشراء عبر المواقع الإلكترونية في الولايات المتحدة عبر الرابط: www.solarscope.org/us/index.us.html، وفي المملكة المتحدة عبر الرابط:

.www.solarscope.org/en/index.en.html

لمشاهَدةِ الخطِّ هيدروجين- ألفا، ذي اللون الضارب إلى الحُمْرة، للغِلاف اللوني للشمس والشُّوَاظ الشمسي الناتئ من حافة الشمس، تتوافر تلسكوباتٌ ذاتُ مرشحاتٍ مثبتة مقابلَ 1000 جنيه إسترليني تقريباً. ويُمكِن أيضاً تثبيتُ هذه المرشحاتِ على التلسكوبات الصغيرة المتوفرة بالفعل.

يوجد تاريخٌ مُوجَزٌ لرصْدِ البُقَع الشمسية عبر الرابط:

,http://solar- center.stanford.edu/about/sunspots.html

وهناك مناقشةٌ حولَ اكتشافِ البُقَع الشمسية على الرابط التالي:

.www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/ news/400yrs- spots.html

المجموعاتُ التالية التي تضمُّ فلكيّين هُواةً مُكرَّسةً لدراسةِ الشمس:

مجموعةٌ فرعية للرابطة الأمريكية لمراقِبي النجوم المتغيِّرة American Association of Variable Star Observers، مخصَّصة لرصْدِ البُقَع الشمسية:

www.aavso.org/solar.

ينشر قسمُ الطاقة الشمسية لرابطةِ مُراقِبي القمر والكواكب

Association of Lunar and Planetary Observers

عمليـاتِ الرصْـدِ عبـر الرابـط:

alpo- astronomy.org/solar.

مشروعُ تشارلي بيتس لعلمِ الفلك الشمسي مُخصَّص للتوعيةِ بالطاقة الشمسية:

www.facebook.com/groups/charliebatessolarastronomyproject/.

من بين المجموعات العديدة على موقع فيسبوك، هناك مجموعةٌ مخصَّصة لرصْدِ الطاقة الشمسية هي:

www.facebook.com/groups/solaractivity/.

يُمكِنك طلبُ مرشحاتٍ شمسية ذاتِ كثافةٍ محايِدة، لرصْدِ البُقَع الشمسية، وهي مُعَدَّة لتناسِبَ تلسكوبك من عدةِ مُورِّدين، وخاصةً: ثاوزند أوكس أوبتيكال،

www.thousandoaksoptical.com

يُمكِنك طلْبُ شراءِ مرشحات هيدروجين- ألفا لمشاهَدةِ الغِلاف اللوني والشُّوَاظ الشمسي لتلسكوبك الشخصي (أو للحصول على مُشاهَدةٍ أفضل، شراء مرشحات مُشاهَدة الأطوال الموجية للخطوط H، أو K للكالسيوم)، عبر الروابط التالية:

داي ستار فلتر كورب،

Daystar Filter Corp، http://daystarfilters.com.

لونت سولار سيستمز،

.Lunt Solar Systems, http://luntsolarsystems.com

سكولارسكوب، Solarscope، (جزيرة مان)،

.www.solarscope.co.uk

ويُمكِنك طلبُ شراءِ التلسكوبات الشمسية المناسِبة المزوَّدة بمرشحات إتش- ألفا أو الخط الطيفي للكالسيوم عبر الروابط التالية:

داي ستار فلتر كورب،

.http://daystarfilters.com

كورونادو coronado «تلسكوب شمسي شخصي» به مرشحات إتش- ألفا أو الانبعاث الخطي K، ومتوفرٌ لدى العديدِ من متاجر الكاميرات ومُورِّدي التلسكوبات، يُمكِنك طلبُ المشورة عبر الموقع الإلكتروني للشركة المصنِّعة:

.www.meade.com/products/ coronado.html

لونت سولار سيستمز،

.http://luntsolarsystems.com

سكولارسكوب (جزيرة مان)،

.www.solarscope.co.uk

هناك موقعٌ مخصَّصٌ لحشْدِ المصادر الخاصة بتقسيمِ البُقَع الشمسية وتصنيفها عبر الموقع الإلكتروني:

.www.sunspotter.org

ثمة جهازُ رصدٍ شمسي مُدمَج لمشاهدةِ قُرصِ الشمس بصورةٍ بيضاء لرؤيةِ البُقَع الشمسية، متاحٌ عبر الرابط:

,www.scientificsonline.com/product/sunspotter

www.teachersource.com/product/ sunspotter- solar-و
.telescope/astronomy- space

الملحق 3:
رَصْد الإكليل وقتَ الكسوف الشمسي

نرى أن المشهدَ الأكثر بهاءً الذي يُمكِن لأي شخصٍ رؤيتُه هو مَشهدُ الكسوف الكلي للشمس. فالعتمةُ التي تُصِيب السماءَ في منتصف النهار، والظاهرةُ المذهِلة التي تعلو رؤوسَنا تُعَد تجرِبةً رائعة. لكن الكسوفَ الكلي للشمس لا يحدث إلا مرةً واحدة كلَّ ثمانيةَ عشرَ شهراً في مكانٍ ما في العالَم، ولا يتجاوز نطاقُه 100 كيلومتر عرضاً، ويمتد طولُه لآلافِ الكيلومترات فقط. ولكي تَشهَدَ هذه التجرِبةَ، لا بدَّ أن تكون في هذا المسار.

ومن الممكن أن تكونَ مُشاهَدةُ لحظةِ تمامِ الكسوف الكلي مَصْدراً لإلهام الطلاب وغيرهم؛ لذا ينبغي تشجيعُ الجميع على السفرِ إلى المناطق التي تَشهَد كسوفاً كلياً. وعادةً ما يتوفر لدى مجتمعاتِ هُواةِ علم الفلك أو القباب السماوية مواقعُ عامةٌ للمُشاهَدة. ويُمكِن للمدرِّسين مساعدةُ طلابهم في الحصول على المرشحات المناسبة لرصدِ الكسوف بها (الشكل 89).



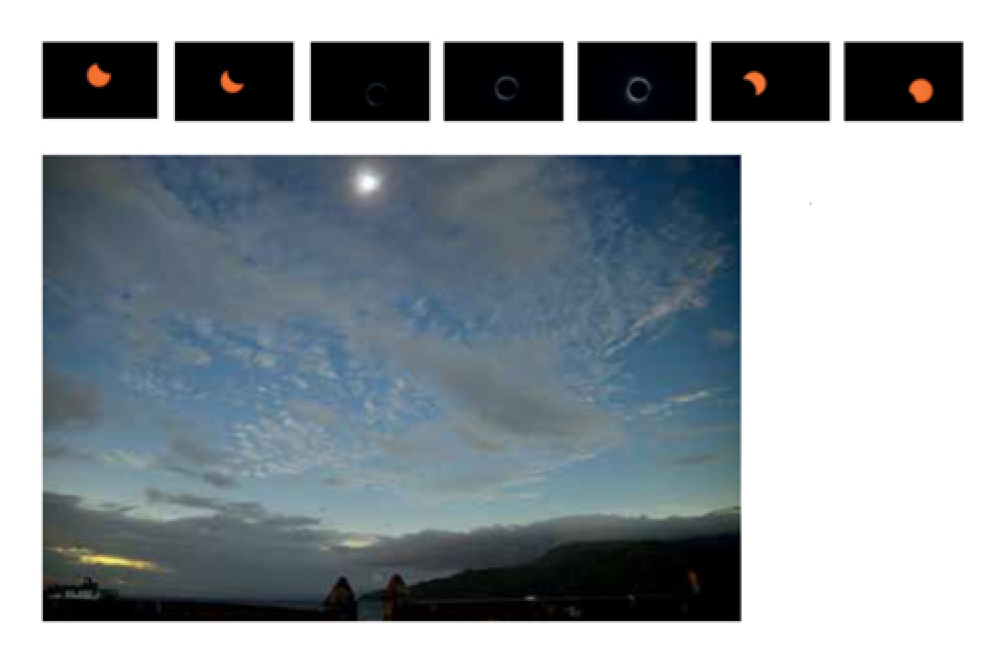
89- صفٌّ دراسي يضمُّ أطفالاً في عمرِ أربع سنوات، ومعَهم مرشحٌ كبيرٌ تبلغ مساحتُه قدماً مربعاً (نصفَ مترٍ مربع)، داخلَ إطارٍ من الورق المقوَّى، ومعَهم «نظّاراتٌ فردية للكسوف الجزئي»

(تجرِّبها واحدةٌ من الأطفال بالنظر في الاتجاه الخاطئ؛ لهذا لم تَرَ شيئاً).

لكن حدوثَ كسوفٍ كلي بنسبة 99% لن يَفِي بالغرض. فالإكليلُ الشمسي أقلُّ سطوعاً بنحو مليون مرة مُقارَنةً بقرصِ الشمس اللامع، وهكذا حتى إذا كان 1% فقط من الغِلاف الضوئي للشمس مرئياً، فإن الجزءَ المتبقي يظلُّ أكثرَ سطوعاً من الإكليل الشمسي 10 آلاف مرة. وكما أوضحنا في الملحقَيْن السابقَيْن، فإنه كلما كان جزءٌ صغير، حتى من شمس النهار مرئياً (الغِلاف الضوئي)، فستحتاج إلى استخدامِ مرشحاتٍ شمسية خاصة كي تستطيعَ النظرَ إلى الشمس بأمان.

وحتى إذا كنتَ موجوداً في المنطقة التي تَشهَد كسوفاً كلياً، فستحتاجُ إلى نظاراتِ الكسوف الجزئي (غالباً ما يُطلَق عليها ببساطةٍ وبشكلٍ مضلِّل «نظَّارات الكسوف») لمدةِ ساعةٍ أو نحو ذلك من زمن الكسوف الجزئي حتى حدوث الكسوف الكلي، ولمدةٍ زمنية مماثِلة بعدَ انقضاءِ الكسوف الكلي. ولن يَسَعَك ملاحظةُ حدوثِ كسوفٍ إلا خلالَ الدقائق القليلة الأخيرة من طورِ الكسوف الكلي، ما لم يَكُن بإمكانك النظرُ عبرَ نظاراتٍ خاصة.

في الحقيقة، نحن نفضِّل بطاقاتِ الترشيح، وهي بطاقاتٌ بحجمِ كفِّ اليد بها مادةُ الترشيح، ويكون عليك الإمساكُ بها بدلاً من وجودِ ذراعَيْن لارتدائها فوقَ الأذنَيْن. تتغيَّر أطوارُ الكسوف الجزئي تدريجياً، ويَكْفي إلقاءُ نظرةٍ سريعة لبضعِ ثوانٍ عبر مرشحٍ كلَّ خمسِ دقائق أو نحو ذلك. لذا، من الأفضل تجنُّبُ إغراءِ التحديق في الشمس كلَّ دقيقة، ولكن يُمكِنُك فعْلُ ذلك بأمانٍ إذا كنتَ ترتدي نظارات الكسوف الجزئي المناسِبة.



90- صورةٌ ذاتُ زاويةِ تصويرٍ واسعةٍ التُقِطتْ في أثناءِ الكسوف الكلي للشمس في 9 مارس 2016 على جزيرة تيرنات الإندونيسية، وتتَّضِح فيها ظاهرةُ الكسوف الكلي وتغطِّيها سحابةٌ

رقيقة. الصورةُ مُلتقَطةٌ بكاميرا نيكون D600، وبعدسةِ تكبير نيكور بفتحةِ تكبير يتراوح قُطرُها بين 24 و85 مليمتراً، وبُعد بؤري f/8 عند 24 مليمتراً. يَظهر في الجزء العلوي من الصورة طورُ الكسوف الجزئي والكلي، الأولُ مُلتقَطٌ بكاميرا نيكون D7100، وبعدسة نيكور بفتحةِ تكبير 80- 400 مليمتر عند 400 مليمتر ومرشح كويستار. أمَّا صورةُ الكسوف الكلي فاستُخدِمت فيها كاميرا نيكون D7100 بعدسة نيكور 500 مليمتر، وبُعد بؤري f/8، من دونِ استخدامِ مرشح.

عندما يبدأ الهلالُ الشمسي في التضاؤلِ من نقطةٍ لأخرى (كما تراه عبرَ نظاراتِ الكسوف)، تكون أنت على وشْكِ مُشاهَدةِ الكسوف الكلي. وعندما يتضاءل الهلالُ الشمسي تماماً عندما تراه عبرَ النظارات، فإنك حينئذٍ تَشهَد خرزات بيلي Baily's beads، وبدءاً من هذه اللحظةِ يُمكِنُك النظرُ إلى الكسوف مباشَرةً، ولكن لا تُطِلِ التحديقَ ما دامَتِ الخرزاتُ البيضاء الساطعة موجودةً، فقط أَلْقِ نظرةً خاطفة لثانية أو ثانيتَيْن. آخِرُ خرزات بيلي تتخذ شكل حلقةٍ ماسية (وفي أحوالٍ نادرة تكون حلقةً ماسية مزدوجة)، وفي الثواني القليلة التي تتضاءلُ فيها الحلقةُ الماسية، يكون النظرُ المباشِرُ إلى الشمس المُنكسِفة آمِناً.

يُمكِن للمرء، عادةً، مُشاهَدةُ هلالِ الغِلاف الضوئي للشمس (سطح الشمس الذي نراه يومياً) باستخدامِ «كاميرا ذات ثقب»، فقط بصُنع ثقبٍ قُطرُه بضعةُ مليمتراتٍ في قطعة من الورق المقوَّى، والنظر للأسفل لمشاهَدة الصورة الساقطة، وتكونُ الشمسُ خلفَك بأمان. لكن نظاراتِ الكسوف الجزئي أصبحتِ الآنَ متوفرةً بسهولة وبثمنٍ زهيد؛ ومن ثَمَّ فهي خيارٌ أفضلُ مُقارَنةً بصور الكاميرا ذات الثقب التي تبدو باهتةً وغيرَ مُمتِعة.

ويُمكِن لأي شخصٍ على درايةٍ برصد الشمس أيضاً أن يستقبلَ إسقاطَ الصورة باستخدامِ تلسكوبٍ أو مِنْظار (مثبت للخلف)، ولكنْ مرةً أخرى، اجعلِ الشمسَ في ظهرك وانظرْ فقط إلى الأرضِ أو الجدارِ أو الشاشةِ التي يتكوَّن عليها إسقاطُ الصورة.

بمجردِ اختفاءِ الحلقة الماسيَّة، يُمكِنك إبعادُ المرشح من أمام عينَيْك وسترى الغِلافَ اللوني الضارب إلى الحُمْرة ويحيط به الإكليلُ الشمسي الذي له بياضُ اللؤلؤ، والصورةُ الظلية السوداء للقمر. ويظلُّ الإكليلُ الشمسي مرئياً طيلة مدةِ الكسوف الكلــي التام، وتتراوحُ مدتُـه بين دقيقتَيْن ودقيقتَيْن وأربعين ثانية تقريباً، علـى خطِّ منتصفِ الكسوف الكلي بالنسبة للكسوف الأمريكي لعام 2017، ولأكثر من ستِّ دقائق فـي حالِ أطولِ كسوفٍ كلي مُمكِن في الوقت الحالي كما يُشاهَد من الأرض.

ولا يكون بإمكانك النظرُ مُباشرةً إلى الشمس بأمان إلا خلالَ المدة التي يستغرقها الكسوفُ الكلي. وعلى عكس الاعتقادِ الخاطئ لدى بعض الناس، لا تنبعثُ أشعةٌ إضافية من الشمس خلال الكسوف، فالإكليلُ الشمسي موجودٌ دائماً لكننا نكاد لا نراه لاحتجابِه خلفَ السماء الزرقاء، لكنَّ السماءَ الزرقاء انقشعتْ.

عندَ النظرِ من بُقْعة واحدة، لن يكونَ هناك أيُّ تغيرٍ ملحوظ خلال الدقائق (أو الثواني) التي يستغرقها الكسوفُ الكلي، لكن ظلَّ القمر يستغرقُ ساعتَيْن أو أكثرَ ليَقطَعَ مَسارَه الطويل حول سطح الأرض، وبإجراءِ مُقارَنةٍ بين الصور من مواقعَ مختلفةٍ على طول المسار تَظهرُ التغيُّراتُ والتياراتُ الإكليلية والأعمدةُ القُطبية.

إذا كنتَ تُشاهِد كسوفاً كلياً لأول مرة، فعادةً ما تكون النصيحةُ الموجَّهةُ إليك هي الاكتفاء بالمشاهَدة، دونَ أن يَشغلَك التقاطُ الصور عن مُتابَعة هذا المشهد؛ فمن المحتمَل أن تُضيِّع استمتاعَك بالتجرِبة كاملة. وعلى أي حالٍ، سيلتقط المصوِّرون الفلكيون الأكثرُ خبرةً الكثيرَ من الصور التي يُمكِنك الحصولُ عليها (الشكل 90). ولكن، إنْ لم تَستطِعْ مُقاوَمةَ رغبتِك في تصوير الكسوف، فعليك أن تحدِّدَ مدى جِدِّية (أي احترافية) مُعَداتك.



91- مجموعةٌ حديثة من نظَّاراتِ الكسوف الجزئي من مقتنياتِ راصدِ الكسوف لوك كول Luke Cole. يجب نزْعُ النظارات حتى تتمكَّن من مُشاهَدةِ الكسوف الكلي فورَ حجبِ الغِلاف اللوني بالكامل. في بعض الأحيان، لا يحصلُ المرءُ على تعليماتٍ صحيحة حول هذه النظارات التي تَحملُ الاسمَ المضلِّل «نظارات الكسوف» (لا بدَّ بالفعل من تسميتها «نظَّارات الكسوف الجزئي») ويظل مرتدياً إياها لحظةَ الكسوف الكلي؛ لذلك لا يرى أيَّ شيء من الكسوف الكلي لأن الإكليلَ الشمسي شديدُ الخفوت، فلا يُمكِن رؤيتُه عبر هذه المرشحات.



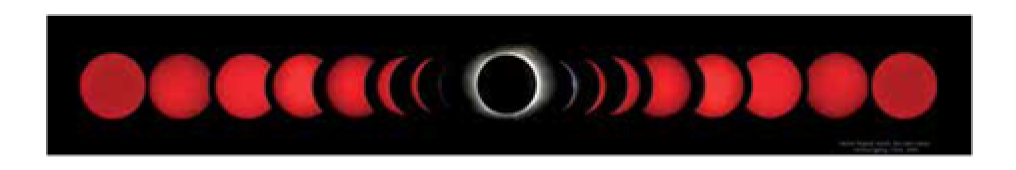
92- وجْها «بطاقةٍ» مستطيلة بها مادةُ المرشح، يُمكِنك الإمساكُ بها بإحدى اليدَيْن ووضْعُها أمامَ عينَيْك، ممَّا يُذكِّرك بإلقاءِ نظرةٍ خاطفة لبضعِ ثوانٍ كلَّ بضعِ دقائق خلال طور الكسوف الجزئي. ويجب ألا تُستخدَم خلالَ طورِ الكسوف الكلي.

في كسوفِ منطقة سفالبارد عام 2015، التُقِطت صورٌ وأفلامٌ رائعة باستخدام هواتف آيفون. ولكن في كثيرٍ من الأحيان إذا استخدمتَ كاميرا الهاتف أو كاميرا الجيب العادية، فربما يستمر «تذبذُبُ» الضبطِ البؤري التلقائي طيلة دقائقِ الكسوف الكلي، ولا يصلُ أبداً إلى البؤرة.

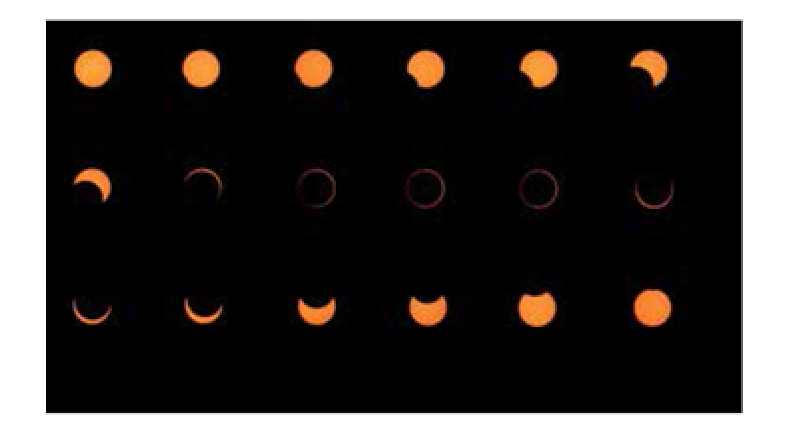
في بعض الأحيان، بدلاً من التقاطِ صورٍ مُقرَّبةٍ تَظهر فيها شمسُ الكسوف كبيرة الحجم داخلَ إطارِ الصورة، يكون التقاطُ صورةٍ بزاويةٍ واسعة أكثرَ متعةً وتشويقاً (وإنْ كان أقلَّ نفعاً من الناحية العلمية)، ويَظهر فيها مَشهدُ غروبِ الشمس المُنكسِفة كلياً. وتكون هذه المحاوَلاتُ مُجديّة فقط خلال الكسوف الكلي؛ لأنه حتى إذا ظهر جزءٌ ضئيل فقط من الهلال الشمسي غير المُنكسِف في إطار الصورة، فسيحدث تعريضٌ مفرط، وما لم يكُن هناك مقدارٌ مناسب من الضباب أو الغيوم، فسيختفي شكلُ الشمس ولن تتبيَّنَ من الصورة حدوثَ الكسوف.

يُشارِك أحدُ مؤلِّفَيْ هذا الكتاب (جاي ميرون باساتشوف) في مشروع «ميغاموفي» Megamovie، ومقره مختبر لورانس بيركلي؛ حيث سيُجرى تحميلُ صورٍ مجمَّعة للكسوف الكلي لعام 2017 (بإذنٍ مسبق من شركة جوجل) وتجميعها في فيلمٍ كامل. وقد ينتهي بنا المطافُ إلى أفلامٍ منفصلة لصورٍ مُلتقَطة بالهواتف الذكية، وصورٍ مُلتقَطة بكاميرات عادية. انظر http:// eclipsemegamovie.org.

تهدفُ تجرِبةُ Citizen Continental America Telescopic Eclipse، وتُعرَف اختصاراً باسم (CATE)، التي نظَّمَها مات بِن Matt Penn، من المرصد الوطني للطاقة الشمسية وآخَرون، إلى وجودِ راصِدين بمُعَداتٍ مُتطابِقةٍ مُتباعِدةٍ في عشراتِ المواقع في جميع أنحاء الولايات المتحدة في عام 2017، بعد تجرِبةِ كسوف 2016 في إندونيسيا.



93- سلسلةٌ من الصورِ الملتقَطة في الكسوف الكلي الذي شهِدَتْه الصين عام 2009، تَظهر فيها الأطوارُ الأولى للكسوف الجزئي عبر مرشحِ الكسوف الجزئي، ثم أطوارُ الكسوف الكلي من دون مرشح، وتأتي بعدَها الأطوارُ الجزئية النهائيةَ عبر مرشحِ الكسوف الجزئي مرةً أخرى.



94- سلسلةٌ من الصور الملتقَطة وقتَ الكسوفِ الحلَقي الذي شهِدَه عامُ 2016 بجزيرة

لا ريونيون في المحيط الهندي، ونظراً إلى أن الشمسَ لم تمرّ بطورِ تمامِ الكسوف الكلي في أي وقت، تعيَّنَ استخدامُ مرشحِ الكسوف الجزئي طيلة الوقت.



95- سلسلةٌ من الصور الملتقَطة للكسوف الجزئي للشمس الذي شهِدَتْه دولة جنوب أفريقيا عامَ 2015، ونظراً إلى أن الشمسَ لم تَشهَد كسوفاً كلياً في أي وقت، تعيَّنَ استخدامُ مرشحِ الكسوف الجزئي طيلة الوقت، باستثناءِ الأوقات القصيرة في الصباح الباكر عندما كان الغطاء السحابي كثيفاً جداً للحد الذي يسمحُ برؤيةِ الشمس المُنكسِفة جزئياً عبر السُّحُب.

يُمكِنك زيارة الرابط التالي:

./https://sites.google.com/site/citizencateexperiment/home

إذا كنتَ تستخدمُ كاميرا قياسيةً ذاتَ عدسةٍ أحاديةٍ عاكسة (كاميرات نيكون وكانون من العلامات التجارية الشائعة)، فستحتاجُ إلى استخدامِ عدسةِ تقريبٍ كبيرة. عادةً ما تكونُ العدسةُ ذاتُ البُعْد

البؤري 500 مليمتر مثاليةً في حالة الكاميرات ذات الإطار الكامل، وتستخِدم العديدُ من الكاميرات الآن رقائقَ بحجم 2/3 (أيْ شرائح يبلغ حجمُها ثُلثَيْ حجمِ الرقائق ذاتِ الحجم الكامل - ويُعبَّر عنها بـالرمز FX في مصطلحات نيكون، والتي تتطابق مع حجمِ إطارِ فيلم 35 مليمتراً، الـذي يستخدمه قلةٌ مـن الأشخاص في الوقت الحالي، بالنظر إلى الثورة الإلكترونية). تكون الرقائقُ بحجم 2/3، (ويُعبَّر عنها بـالرمز DX في مصطلحات نيكون)، مُكافِئةً لعدسة 300 مليمتر تقريباً. تُظهِر هذه الصورُ المقرَّبة قرصاً شمسياً كاملاً ويَظهر الإكليل محيطاً به، ويمتدُّ إلى الخارج ربما لنصفِ قُطْرٍ شمسي أو نحو ذلك، وجزءاً من السماء المحيطة بالإكليل، المثيرة للانتباه من الناحية الجمالية (توفر أيضــاً بعض الحركــة للشمس خلال دقائق الكسوف الكلي).

عند التقاطِ صورةٍ مُقرَّبة للكسوف، من المهم جداً تثبيتُ الكاميرا على حاملٍ متينٍ ثلاثيِّ القوائم. حاوِلْ أيضاً استخدامَ سلكٍ (أو وحدة تحكم لاسلكية) لإفلاتِ غالقِ العدسة دونَ الحاجةِ إلى لمس الكاميرا، حتى لا ينتج عن ذلك أي اهتزاز.

فـي أثناء الكسوف، سيكونُ عليك التقاطُ سلسلةٍ من التعريضات الضوئية التدريجيّة عادةً، وهـو ما يُسـمى «التصحيح». ولذلك، قد تلتقطُ صوراً عند 1 ثانية، و1/2 ثانية، و1/4 ثانية، و1/8 ثانية، و1/16 ثانية، و1/32 ثانية. ومن الأفضل ضبْطُ «السرعة» (إعدادات الأيزو) على مستوى معتدلٍ مثل أيزو 800. وعلى الرغم من وجودِ إعداداتٍ للكاميرا عند أيزو 8 أو أعلى من ذلك، فإن الإعدادات الأعلى عادةً ما تجعلُ الصورَ أكثرَ تشويشاً (أكثر تحبُّباً). اضبطْ فتحةَ العدسة (إذا كانتْ قابلةً للتعديل، وبعضُ الصورِ المقرَّبة الطويلة تُلتقَط بعدساتِ مرآةٍ وتكون غيرَ قابلةٍ للتعديل) على واحدةٍ أو اثنتَيْن من نقاطِ التوقُّف f (f هي النسبة البؤرية؛ أي البُعد البؤري للعدسة مقسوماً على قُطْرها)، وتكون أكثرَ انغلاقاً بدلاً من انفتاحها بالكامل، نظراً لأن العدسات غالباً لا تكونُ دقيقةً تماماً عند ضبطِ إعداداتها على أوسعِ زاوية. لذا، إذا كانتْ عدسةُ الكاميرا الخاصة بك لها نطاقٌ من f/4 إلى f/32، فاضبطْها على نقطةِ توقُّفٍ واحدة أعلـى من f/4؛ ألا وهي f/5.6 . (بتربيعِ كِلا الرقمَيْن، ستُلاحِظ أن منطقةَ الفتحة تساوي فارقاً بمعاملٍ قَدْرُه 2 بين هذين الإعدادَيْن). من بين الأمور اللطيفة المتعلقة بتصويرِ الكسوف أنه نظراً لاتساع نطاقِ سطوع الإكليل الشمسي - يكونُ الطرفُ الشمسي أكثرَ سطوعاً بمقدارِ ألفِ مرة مُقارَنةً بالسطوع على مسافةٍ أبعدَ بمقدارِ نصفِ قُطْرٍ شمسي - فإن كلَّ تعريضٍ يناسب جزءاً من الإكليل. ويتَّضِح نطاقُ مدى الإكليل عن طريقِ سلسلةٍ من التعريضات.

لا تَنْسَ تنزيلَ صورِ الكسوف التي التقطْتَها والاحتفاظَ بنسخةٍ احتياطية منها، فأنت لا ترغبُ بالطبع في ضياعها بطريق الخطأ.

بعدَ دقائقِ الكسوف الكلي، ستبدأ الحلقةُ الماسيّة فجأةً في السطوع على الجانب الآخَر للحلقة الماسية للقرص الشمسي المتكوِّنة في بداية الكسوف الكلي. وهذه إشارةٌ لك لإبعادِ عينَيْك، والبدْءِ مرةً أخرى في مراقَبةِ الكسوف فقط من خلال أحدِ مرشحاتِ الكسوف الجزئي الخاصة (الشكل 91) أو بطاقات الترشيح (الشكل 92).

الملحق 4:
رَصْد الشمس من الفضاء

إن إجراء عملياتِ الرصد من الفضاء أمرٌ شديدُ الصعوبة. لنفترِض أنَّ لديك تلسكوباً وترغبُ في توجيهِه نحوَ هدفٍ ما والتقاطِ بعض الصور. كيف يتسنَّى لك فعْلُ هذا في الفضاء؟ لن تستطيع وضْعَ التلسكوب على الأرض، لأنه لا توجد أرض. ولا تستطيع النظرَ عبر العدسة لأنك في الغالِب موجودٌ على الأرض، أو إذا كنتَ رائدَ فضاء فأنت على الأرجح داخلَ بيئةٍ مَحْميَّة في حين يوجد التلسكوبُ في الخارج. ولأسبابٍ مُشابِهة، ليس بمقدورك أيضاً توجيهُ التلسكوب ناحيةَ هدفك، وإذا التقطْتَ صورةً بالفعل، فماذا ستفعل بها؟ وبالعودة بِضعَ خطوات، كيف صعد تلسكوبُك إلى الفضاء في المقام الأول؟ إنه في أغلب الظن جهازٌ بصري عالي الجودة، فكيف إذن نجا من عمليةِ إطلاقٍ مُرهِقة ومليئة بالاهتزازات والتسارُع الشديد؟ وبمجردِ خروجِ التلسكوب إلى الفضاء فقد أصبحَ داخلَ فراغ، وتسخِّنُ الشمسُ أحدَ جوانبه وترفعُ حرارتَه إلى مئات الدرجات (دون أن يوجدَ هواءٌ لتبريده) في حين يشعُّ الجانبُ الآخَر الحرارةَ كي يبردَ لدرجةٍ تجعله يتجمَّد. ومن ثَم سيحدث تمدُّدٌ وانكماشٌ للجزأَيْن الساخن والبارد على الترتيب من التلسكوب؛ مما يؤدي إلى انثناءِ وتشوُّهِ البصرياتِ والتراكيبِ المرتبطة بها، وهو ما يتسبَّب في مشكلاتٍ جسيمة في التركيز والانحراف، وفي الوقت نفسه تؤدِّي الجُسيمات العالية الطاقة التي تخترق الجهازَ إلى تدميرِ أي مُعَداتٍ إلكترونية.

لإعدادِ موقعِ رصدٍ في الفضاء، يجب توافرُ أربعةِ مكونات رئيسة:

1- لا بدَّ أن يكون الجهازُ الذي تَنْوي استخدامَه (الشكل 96) مُصمَّماً خصِّيصاً للعمل في بيئة الفضاء القاسية، ويتضمَّن إلكترونياتٍ تحوِّلُ الصورةَ أو أي إشارةٍ أخرى منشودة إلى شكلٍ يتناسب مع الإرسال الراديوي العائد إلى الأرض.

2- نظامِ دعْمٍ يُسمى عادةً «مركبة فضائية»، وتوفر هذه المركبة الطاقةَ، والتوجيهَ (لكي توجِّهَ التلسكوب صوْبَ الهدفِ المنشود)، ومُعالَجةَ البيانات، وحفْظَها، والقياسَ عن بُعْد.

3- صاروخ حامل لإرسالِ المرصد (التلسكوب والمَرْكبة الفضائية) إلى الفضاء.

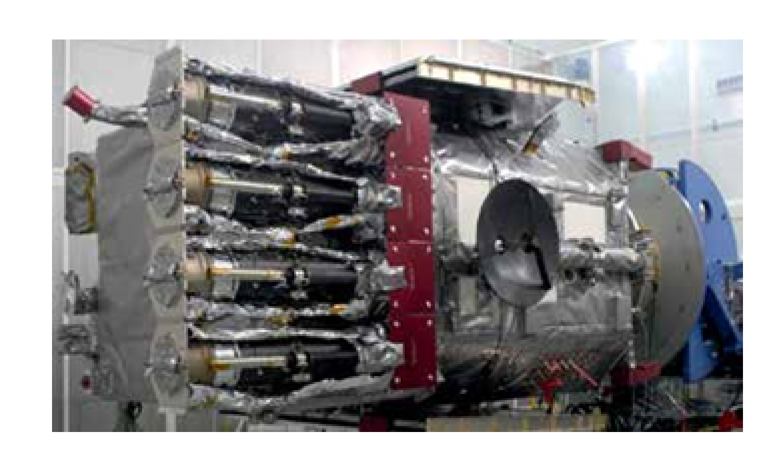
4- محطة أرضية لتلقّي البيانات وإتاحتِها للعلماء الموجودين على الأرض.

سنستعرضُ هذه القائمةَ بنداً بنداً، ونتحدث عن الاحتياجات والمتطلّبات المرتبطة بالرصد من الفضاء. لكنْ علينا أولاً أن نطرحَ سؤالاً، وهو: لماذا قد يَرغبُ أحدهم في إجراءِ مُشاهداتٍ فلكية من الفضاء، بالرغم من صعوبةِ هذا الأمرِ مُقارَنةً بإجرائها من الأرض؟ الإجابةُ المختصرة هي أننا نرصدُ من الفضاء عندما تكون تلك هي الطريقة الوحيدة، أو على الأقل الطريقة المُثلى، للحصولِ على البياناتِ المرغوب فيها. على سبيل المثال، الأطوالُ الموجية للضوء في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية لا تصِلُ إلى الأرض لأن الغِلافَ الجوي للأرض يمتصُّها، وتتركزُ معظمُ الأطوال الموجية المهمة الصادرة عن الشمس والنجوم في نطاقِ الأشعة فوق البنفسجية هذا. وعليه، فإن الطريقةَ الوحيدة لرصْدِ هذه الأطوال الموجية هي تثبيتُ الجهازِ فوق الغِلاف الجوي.

الجهاز

الاعتبارُ الأهم الذي تجب مراعاتُه عند وضْعِ جهازٍ في الفضاء هو أن تُدرِكَ تمامَ الإدراك أنك بمجردِ إطلاقه، لن تتمكَّن بعد ذلك من لمْسِه مجدداً على الإطلاق. فلن تعدِّلَه، ولن تجهِّزَه بأسلاكٍ جديدة، ولن تُصلِح أيَّ جزءٍ مكسور فيه؛ لا شيءَ يُمكِن فِعلُه إن كان الأمر يتطلَّب وجودَ شخصٍ ما فعلياً معه. (رحلاتُ الفضاء المأهولة هي الاستثناء، لكنَّ نسبةً قليلة فقط من هذه الرحلات مخصَّصةٌ لأجهزةِ الرصد الموجودة في الفضاء). ولا بدَّ من مُراعاةِ هذه الحقيقةِ الأساسية بدايةً من المراحل الأولى لعملية التصميم.

العاملُ التالي في الأهمية هو فَهْمُ الظروف البيئية التي سيُواجِهُها الجهازُ في الفضاء؛ فجانبُ الجهازِ المواجِه للشمس سيصبح ساخناً للغاية؛ فدرجةُ حرارته ستزيد عن درجةِ غليان الماء إلا في حالةِ اتخاذِ خطواتٍ خاصة، ولا يوجد هواءٌ لتبريده أو إعادةِ توزيعِ الحرارة. وبينما يسخن أحدُ الجوانب، سيُواجِه الجانبُ الآخَر الفضاءَ العميق وسيشعُّ دِفْأَه بعيداً حتى يصلَ إلى درجةِ حرارةٍ تقلُّ عن سالب 100



96- تجميع تلسكوب مُغلَّف داخلَ ورقِ ألومنيوم عازلٍ ومُدمَج في المَرْكبة الفضائية. قد لا يبدو جميلاً للغاية، لكنَّ العلماءَ والمهندسين الذين قاموا ببنائه يَرَونه خلاباً بالطبع.



97- عند دمْجِ الأدوات داخلَ المَرْكبة الفضائية، تُسمى الوَحْدةُ ككلٍّ «مرصداً». التلسكوباتُ الأربعة المكونَةُ لمجمعِ التصوير الجوي تَبرزُ من أعلى الجسم على اليسار، على أقصى يسارِ هيكلِ الدعم لمرصد ديناميكا الشمس.

درجة مئوية، إلا في حالةِ اتخاذِ إجراءاتٍ خاصة مجدداً. ومثل هذه التغيُّراتِ الحادة في درجة الحرارة من شأنها تشويهُ هذا الجهاز الرقيق والدقيق، بل وتعطيلُه أيضاً، ولعل هذا هو السببُ في أنه عادةً ما يُغلَّف بمادةٍ عازلةٍ عاكسة رقيقةٍ وخفيفةِ الوزن. وعند الضرورة، تُلصَق سخَّاناتٌ بجسم الجهاز أسفلَ ورقِ الألومنيوم العازل، للحفاظ على درجةِ الحرارة المنشودة.

البندُ التالي في قائمةِ المَخاطِر هو النَّجاةُ من عملية الإطلاق. إن المَرْكبةَ المستخدَمة لوضْعِ الجهاز في المدار تُصدِر اهتزازاتٍ وتتسارعُ بعنفٍ يَكْفي لتحطيمِ معظمِ الأجزاء العادية للجهاز. ويجب أن يَنجوَ جهازُ الرصد الرقيق المعقَّد الذي قمتَ ببنائه من إطلاقِه من داخلِ مدفع (مَجازاً)، ثم ينجو من اهتزازاتٍ تُحطِّمُ العِظامَ قد تستمرُّ لعدةِ دقائق. تُوظَّفُ مجموعةٌ من تقنياتِ التصميم الخاصة للحدِّ من تأثيرِ انتقالِ الاهتزازات من محرك الصاروخ إلى الجهاز، وللتأكُّد من نجاةِ الجهاز من قُوى الاهتزاز المتبقية. وتُجرَى مجموعةٌ من الاختبارات الشاملة على الأرض لضمانِ نجاةِ الجهاز، وعادةً ما تكون هناك حاجةٌ لإعادةِ التصميم بعدَ الاختبار إذا لم تكُنِ النتائجُ مُرْضيةً.

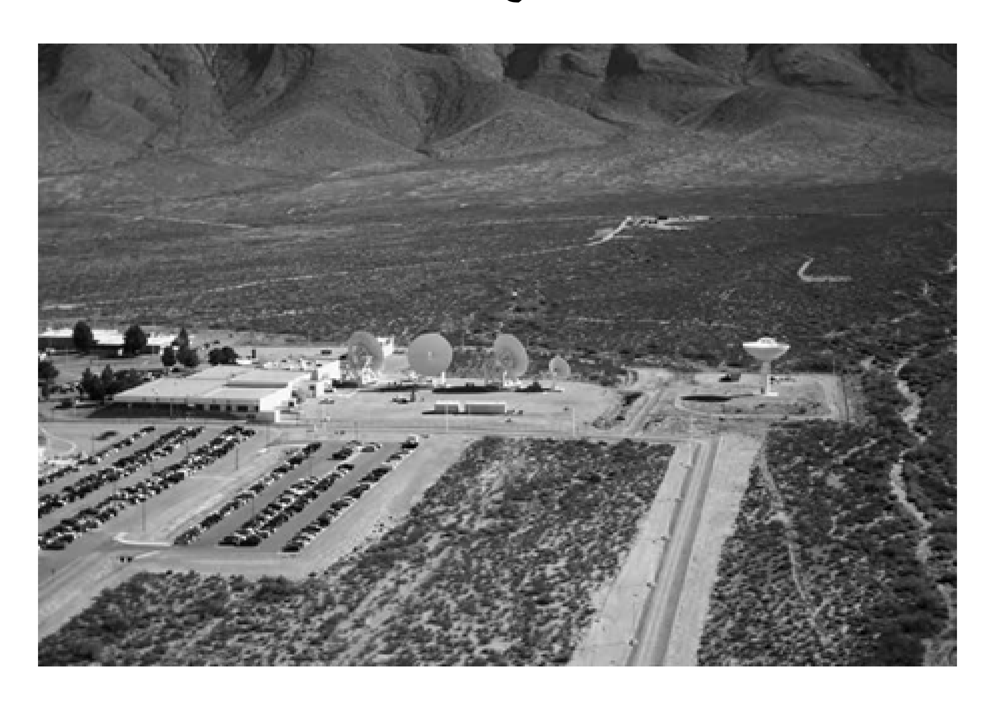
ويُراعى أثناءَ التصميم عاملُ الإشعاع. فالفضاءُ مليءٌ بجُسيماتٍ عاليةِ الطاقة تُسمَّى الأشعة الكونية التي تَصدرُ عن الشمس والفضاء الكوكبي على حدٍّ سواء. تخترقُ هذه الجُسيماتُ الجهازَ ويُمكِنها أن تتداخلَ مع مكوناته الإلكترونية، فتسبِّب أخطاء أو قد تدمِّر مكوناته الحسَّاسة. ومن الممكن حمايةُ الأجزاء الحسَّاسة، مثل المستشعرات، بدِرْعٍ واقٍ، لكن الدِّرْعَ ثقيلُ الوزن وعادةً ما يكون وزنُ الجهاز الإجمالي محدوداً للغاية. وهنا يجبُ استخدامُ نُسَخٍ مُصمَّمة خصيصاً من المكونات الإلكترونية تكون أقل حساسيةً للتلف الذي يسبِّبه الإشعاع. ويستغرقُ تطويرُ واختبارُ مثلِ هذه المكونات وقتاً؛ وعليه فإن الإلكترونيات المتاحة على متنِ المركبات تُعَد عتيقةَ الطراز وفقاً للمعايير الأرضية.



98- أطلِقَ مرصد ديناميكا الشمس إلى المدار المتزامِن مع الأرض على متنِ الصاروخ أطلس 5 Atlas v.

المركبة الفضائية

يُوضَع جهازُ الرصد عادةً على متنِ نظامٍ داعمٍ للحياة يُسمى المَرْكبة الفضائية التي توفر الطاقةَ والقدرةَ على التوجيه (عند الحاجة إلى ذلك) ومصادرَ حاسوبيةً، واتصالاً راديوياً ليتسنَّى إرسالُ البيانات إلى الأرض، وكذلك - كما يحدث في أغلب الأحيان - إرسال الأوامر من الأرض إلى الجهاز (الشكل 97). ويتطلَّب بناءُ مَرْكبةٍ فضائية مهاراتٍ متخصصة وفِرَقاً من المهندسين الخبراء. وفيما يتعلَّق بالأبحاث العلمية، عادةً ما تبني المَرْكبةَ الفضائيةَ شركاتٌ متخصِّصة في صناعةِ الطيران والفضاءِ بالتعاقُد مع وكالة ناسا.



99- يُرسِل مرصد ديناميكا الشمس عبرَ خطِّ الاتصال بالأرض البياناتِ العلميةَ من هوائياتٍ توجد فوقَه إلى المحطة الأرضية التي تحتوي على هوائيَّيْن عَرْضُهما 18 متراً منصوبَيْن في قاعدةٍ عسكرية تُسمى وايت ساندز ميسايل رينج في نيو مكسيكو.

إن عمليةَ ربْطِ أو دمْجِ الجهاز بالمَرْكبة الفضائية طويلة ومعقَّدة، لأسبابٍ مُشابِهة لتلك التي سبَقَ وصْفُها أعلاه فيما يتعلَّق باختبارِ الجهاز نفسه. ولا بدَّ من اختبارِ الجسم بالكامل، الذي يُسمى الآن مرصداً، للتأكُّد من أن جميعَ وظائفه تعمل كما هو متوقَّع، وأنه سينجو من اهتزازاتِ الإطلاق،

وسيتعاملُ مع درجاتِ الحرارة كما هو متوقّع بعد إطلاقه إلى المدار. وقد تستمر هذه الاختبارات البيئية في بعض الأحيان لعدة أسابيعَ قبلَ الإعلانِ عن جاهزيةِ المرصد للإطلاق.

الصاروخ الحامل

عادةً ما يكون الإطلاقُ البندُ الأعلى تكلفةً في عمليةِ بناءِ جهازٍ ووضْعِه في الفضاء. والمشكلةُ الأساسية هنا هي أنه لا بدَّ من دفْعِ الحملِ الصافي - الجسم الذي سيُوضَع في المدار - إلى الأعلى بسرعاتٍ فائقة. ولبلوغِ مدار الأرض، يجب أن يصلَ القمرُ الاصطناعي إلى سرعةٍ تُناهِزُ خمسةَ أميالٍ في الثانية، وإلا فإنه سيسقط مجدداً على الأرض. وللإفلات من قوة الجاذبية الأرضية، يجب أن يصِلَ إلى سرعةِ سبعةِ أميال في الثانية. وفي كلتا الحالتَيْن، لا بدَّ من حرْقِ قدرٍ هائل من الطاقة لتسريعِ أيِّ شيءٍ وجعله يصِلُ إلى مثلِ هذه السرعات. وأفضلُ وسيلةٍ نَمْلكها في وقتنا الحالي كي نفعلَ هذا هي حرْقُ الوَقُودِ بعنفٍ داخلَ حجرةِ احتراقٍ وطرْدُه بسرعةٍ عالية للغاية من الفُوَّهة الخلفية لمحرِّك الصاروخ. وبالرغم من كلِّ المُحاوَلاتِ المُضْنِية التي بُذِلت طوالَ عقود، فإنه لم يُعثَر بعدُ على وسيلةٍ أفضل.

لا نحتاجُ إلى كثيرٍ من التفكير لنفطنَ إلى أنه كلما قلَّ وزنُ الكتلة، التي تُرسِلها إلى الفضاء، قلَّ قدْرُ الوقودِ الذي تحتاجه. ولعلَّ هذا هو السببُ في أن الصواريخَ المدارية تَستخدِم طوالَ الوقت تقريباً تقنيةَ المراحلِ المتعددة؛ إذ تبدأ المرحلةُ الأولى عمليةَ التسارُع، وعندما يُستهلَك الوقودُ يتم التخلُّص من خزَّانِ الوقودِ الكبير، وتبدأ بعد ذلك المرحلةُ الثانية، دونَ الحاجةِ إلى تسريعِ الكتلة الضخمة للخزَّان الفارغ الخاص بالمرحلة الأولى. وبعضُ الصواريخ الحاملة تَسْتغني عن المرحلةِ الأولى من خلال حمْلِها أسفلَ طائرةٍ نفَّاثة ضخمة تنطلقُ بسرعةِ مئاتِ الأميال في الساعة وتُسقِط الصاروخَ كي ينطلقَ بمفرده. وتُوظَّف هذه الطريقةُ مع الأحمالِ الصافية الصغيرة والمتوسطة (الشكل 98).

المحطة الأرضية

تتطلَّب معظمُ المهامِّ العلميةِ إعادةَ البيانات مرةً أخرى إلى الأرض، كي يحلِّلَها الفريقُ العلمي. وبالطبع تُنفَّذ هذه المهمةُ عبرَ الاتصالِ الراديوي، باستخدامِ جهازِ إرسالٍ وهوائيٍّ في المَرْكبة الفضائية، وهوائيٍّ ضخم مُتصل بجهازِ استقبالٍ على الأرض (الشكل 99). إن حجمَ البيانات الذي نحتاجُ إلى إرساله إلى الأرض سوف يؤثِّر بقوةٍ على تكلفةِ تشغيلِ المرصد؛ لأن وصلاتِ البيانات الهابطةَ هذه قد تكون باهظةَ التكاليف. واعتماداً على المدار، من الممكن أن تقتصرَ الاتصالاتُ الأرضية على مرتَيْن يومياً في المدار شبه الاستوائي، ومن الممكن أن تصلَ إلى ستةَ عشرَ اتصالاً

يومياً في المدار القُطّبي، أو حتى إلى اتصالٍ مستمر تقريباً في المدار الأرضي الجغرافي المتزامن. وبمجرد وصولِ البيانات إلى الأرض، لا بدَّ من نقْلِها إلى العلماء، عبرَ شبكةِ الإنترنت بالتأكيد. وللاضطلاعِ بمهمةِ تصويرٍ تتضمَّن مشاهدةً مستمرة وصوراً ضخمة، لا بدَّ من توافرِ خطوطِ نقلِ بياناتٍ خاصة عاليةِ السرعة.

مزيد من القراءة

فيما يلي قائمةٌ بالكتب والمقالات غير المتخصصة، وكذلك بعض المقالات المتخصصة، نقدِّمها للقارئ الراغِب في التعمُّق في الموضوعات التي ناقَشْناها في هذا الكتاب. وقد أدرَجْنا أولاً بعضَ الكتب الحديثة التي تقع في نطاق الاهتمام العام، ثم الكتب الأكثر تخصُّصاً وارتباطاً بالموضوعات التي تناوَلْناها في كل فصل.

كتبٌ عامة تتناول الشمس

Alexander, David, The Sun (Santa Barbara, ca, 2009). One of the Greenwood Guides to the Universe.

Berman, Bob, The Sun's Heartbeat: And Other Stories from the Life of the Star that Powers Our Planet (New York, 2011)

Bhatnagar, Arvind, and William C. Livingston, Fundamentals of Solar Astronomy (Singapore, 2005). Comprehensive and phenomenological but relatively non- mathematical.

Carlowicz, Michael J., and Ramon E. Lopez, Storms from the Sun: The Emerging Science of Space Weather (Washington, dc, 2000)

Golub, Leon, and Jay M. Pasachoff, Nearest Star: The Surprising Science of Our Sun, 2nd edn (New York, 2014). A non- technical trade book.

Haigh, Joanna D., and Peter Cargill, The Sun’s Influence on Climate ((Princeton, nj, 2015

(Jago, Lucy, Northern Lights (New York, 2001

Lang, Kenneth R., Sun, Earth and Sky, 2nd edn [2006], paperback (reprint (New York, 2014

(The Sun from Space (New York, 2009 , - -

(Meadows, A. J., Early Solar Physics (London, 1970

Mulvihill, Mary, Lab Coats and Lace: The Lives and Legacies of (Inspiring Irish Women Scientists and Pioneers (Dublin, 2009

Pasachoff, Jay M., The Complete Idiot’s Guide to the Sun .((Indianapolis, in, 2003

.Downloadable

Zirker, Jack B., Journey from the Center of the Sun (Princeton, nj, (2001; paperback, 2004

The Magnetic Universe: The Elusive Traces of an Invisible Force , - - ((Baltimore, md, 2009

(Sunquakes: Probing the Interior of the Sun (Princeton, nj, 2003 , - -

الفصل الأول: البُقَع الشمسية

Choudhuri, Arnab Rai, Nature’s Third Cycle: A Story of Sunspots ((Oxford, 2015

Hale, George Ellery, The New Heavens [1922] (Charleston, nc, (2015

Olson, Roberta J. M., and Jay M. Pasachoff, ‘The Comets of Caroline Herschel (1750- 1848), Sleuth of the Skies at Slough’, The Inspiration of Astronomical Phenomena (insap.org) (Bath, 2010); published in Culture and Cosmos, xvi/1- 2 (2012), pp. 53- 76, also at http://arxiv.org/abs/1212.0809

Zhentao, Xu, ‘Solar Observations in Ancient China and Solar Variability’, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, cccxxx/1615 (1990) p. 513, : 10.1098/ rsta.1990.0032

الفصل الثاني: إلقاء نظرة داخل الشمس

Malin, S.R.C., and E. Bullard, ‘The Direction of the Earth’s Magnetic Field at London, 1570- 1975’, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, (1981), p. 357

Oldham’s report on the 1897 earthquake is available for download :at

https://archive.org/details/reportongreatea00oldhgoog

The Five- minute Oscillations on the Solar Surface’, Astrophysics Journal, clxii/3 (1970), p. 993

الفصل الثالث: نبضة شمسية

(King, Henry C., History of the Telescope (New York, 2011

Memoirs of the Royal Astronomical Society, vol. xxvi (1856p. 197

Sabra, A. I., Theories of Light from Descartes to Newton ((Cambridge, 1981

الفصل الرابع: الطيف وأسراره

Comte, Auguste, The Positive Philosophy [1842], Book ii, Chapter 1

Pasachoff, Jay M., ‘The Hertzsprung- Russell Diagram’, in Discoveries in Modern Science: Exploration, Invention, Technology, ed. James Trefil (Farmington Hills, mi, 2015), pp. 474- 8

Pasachoff, Jay M., ‘The H- R Diagram’s 100th Anniversary’, Sky & Telescope

(Smith, A. Mark, From Sight to Light (Chicago, il, 2014

الفصل الخامس: الغِلاف اللوني والشُّوَاظ الشمسي

Foukal, Peter, and Jack Eddy, ‘Did the Sun’s Prairie Ever Stop Burning?’ Solar Physics, ccxlv/2(2007), pp. 247- 9, doi: 10.1007/s11207- 007- 9057- 8

الفصل السادس: الإكليل الشمسي المرئي

Baron, David, American Eclipse: Thomas Edison and the Celestial (Event that Illuminated a Nation (New York, 2017

Espenak, Fred, Thousand Year Canon of Solar Eclipses: 1501 to .2500, (Astropixels, 2014), www.astropixels.com. Maps and tables

Espenak, Pat and Fred, ‘Get Eclipsed’: The Complete Guide to the American Eclipse (incl. a pair of partial- eclipse glasses), $6.00, http://astropixels.com/ pubs/GetEclipsed.html

Guillermier, Pierre, and Serge Koutchmy, Total Eclipses: Science, (Observations, Myths and Legends (New York, 1999

Kepler, Johannes, De Stella nova in pede Serpentarii (On the New (Star in the Ophiuchus’s Foot) (Prague, 1606

Littmann, Mark, and Fred Espenak, Totality: The Great American (Eclipses of 2017 and 2024 (Oxford, forthcoming 2017

Littmann, Mark, Fred Espenak and Ken Willcox, Totality: Eclipses of (the Sun, 3rd edn (Oxford, 2009

Nath, Biman B., The Discovery of Helium and the Birth of (Astrophysics (Charleston, nc, 2012

Nordgren, Tyler, Sun Moon Earth (New York, 2016), http://tylernordgren.com Peter, Hardi, and Bhola N. Dwivedi, ‘Discovery of the Sun’s Million- degree Hot

Corona’, Astronomy and Space Sciences (30 July 2014), http://dx.doi.org/10.3389/ fspas.2014.00002

Zeiler, Michael, ‘See the Great American Eclipse of August 21, 2017’ (incl. 2 partial- eclipse glasses), http://greatamericaneclipse.com

الفصل السابع: الإكليل الشمسي غير المرئي: نقاشٌ يدور في أغلبه حول الفوتونات

Golub, Leon, and Jay M. Pasachoff, The Solar Corona, 2nd edn ((Cambridge, 2010

Mandel’štam, S. L., ‘X- ray Emission of the Sun’, Space Science Reviews, iv/5- 6

.p. 587 ,(1965)

الفصل الثامن: عواصف من الشمس: نقاشٌ يدور في أغلبه حول الجُسيمات والمجالات

(Clark, Stuart, The Sun Kings (Princeton, nj, 2007

Cliver, E. W., ‘Solar Activity and Geomagnetic Storms: The Corpuscular

Hypothesis’, : Transactions of the American Geophysical Union, 609 ((1994b

Solar Activity and Geomagnetic Storms: The First 40 Years’, :‘ , - - (Transactions of the American Geophysical Union, 569 (1994a

Solar Activity and Geomagnetic Storms: From M Regions and‘ , - - Flares to Coronal Holes and s’, eos, lxxvi/8 (1995), pp. 75- 83

Was the Eclipse Comet of 1893 a Disconnected Coronal Mass‘ , - - Eject Solar Physics, cxxii/2 (1989), p. 319

Crooker, N. U., and E. W. Cliver, ‘Postmodern View of M- regions’, Journal of Geophysical Research, xcix (1994), p. 23383

Wulf, Andrea, The Invention of Nature: Alexander von Humboldt’s (New World (New York, 2015

الملحق 1: الرصد الآمِن للشمس

Chou, B. Ralph, in Fred Espenak and Jay Anderson, Eclipse Bulletin: Total Solar Eclipse of 2017 August 21 (Astropixels, 2015), www.astropixels.com, pp. 99- 103 Pasachoff, Jay M., A Field Guide to the Stars and Planets, 4th edn, The Peterson Field Guide Series ((Boston, 2000; updated in 2016

Pasachoff, Jay M., and Michael Covington, The Cambridge Eclipse Photography Guide

(Cambridge, 1993)

الملحق 2: رَصْد الشمس بالنسبة للهُواة

Russo, Kate, Total Addiction: The Life of an Eclipse Chaser [ebook] ((Charleston, nc, 2012

Totality: The Total Solar Eclipse of 2012 in Far North , - - (Queensland, fcproductions. com.au, published by the author (2013

الملحق 3: رَصْد الإكليل وقتَ الكسوف الشمسي

See references for Chapter Six and Appendix i

الملحق 4: رَصْد الشمس من الفضاء

Bester, A., The Life and Death of a Satellite: A Biography of the Men (and Machines at War with Peace (Boston, ma, 1966

شكر وتقدير

يتوجَّه ليون غولوب بالشكر إلى العامِلين في مقر وكالة ناسا، ومركزِ غودارد لرحلات الفضاء، ومركزِ مارشال لرحلات الفضاء، الذين دعموا الأعمالَ الواردة في هذا الكتاب، ويشكر أيضاً إدارةَ مرصد سميثسونيان الفيزيائي الفلكي وقسم الفيزياء الفلكية العالية الطاقة التابع له، والزملاءَ العديدين في أنحاء الولايات المتحدة والعالَم الذين قدَّموا الكثيرَ من الإسهامات في الفيزياء الشمسية. ويتقدم بالشكر للذين قرؤوا أجزاءً من مخطوطةِ هذا الكتاب، أو قرؤوها كلها، وقدَّموا الكثيرَ من التعليقات والتصحيحات: جزيل الشكر إلى آن دافنبورت وجسيكا لُو وجينا سامرا، لما قدَّمْنَ من تعليقاتٍ مفيدة، وإلى وليام هانا ومايكل ليمان وبيتر موريس على وجه الخصوص، لقراءتهم الدقيقة للمخطوطة كلها. ويعرِبُ عن امتنانه بشكلٍ خاص لكلٍّ من آن، وجسيكا وكاسي وأنسل وآدا، وبابلو وليز، وتشارلز وجسيكا وجيكوب، ومانويل وكارلا وكارلوس؛ لما قدَّموه من دعمٍ وتشجيع.

ويودُّ جاي ميرون باساتشوف الاحتفاءَ بذكرى الراحلِ دونالد إتش مِنزِل، والمديرِ السابق لمرصد جامعة هارفارد، وذلك لتعريفه بالكسوف الشمسي حين كان طالباً في السنة الدراسية الأولى بالجامعة، منذ 65 عاماً. وقد عملنا بعد ذلك معاً في كسوف عام 1970 عندما كنتُ زميلاً بحثياً لمِنْزِل في مرصد جامعة هارفارد. وعزَّزَ عملي مع هارولد زيرين في مرصدِ بيغ بير للطاقة الشمسية، التابع وقتَها لمعهد كاليفورنيا للتقنية، معرفتي بالشمس. ودعمتْ كليةُ وليامز أنشطتي، ويشمل ذلك مسؤوليتي عن حضورٍ ودراسةِ أحداثِ الكسوف الشمسي، على مدارِ عقودٍ من وجودي هناك. ولقد حظِيَتْ أبحاثي عن الكسوف وأبحاثي الشمسية الأخرى بالدعْمِ على مر سنواتٍ من جانبِ لجنةِ البحوث والاستكشاف التابعة للجمعية الجغرافية الوطنية، وذلك عبر سلسلةٍ من المِنَحِ البحثية، ومن جانب المؤسسة الوطنية للعلوم (ومؤخراً من جانب قسم علوم الغِلاف الجوي والجغرافيا الفضائية) وسلسلة من الرحلات والمِنَح البحثية من وكالة ناسا. وأتوجَّه بالشكر إلى معهدِ كاليفورنيا للتقنية، وقسمِ العلوم الكوكبية فيه، وإلى البروفيسور أندرو إنجرسول لترحيبه بي خلال الإجازات. وأشكرُ ناعومي باساتشوف، وديبورا باساتشوف/ إيان كيزبوم وإلواز باساتشوف/ توم غلايزر لما قدَّموه من جهود تحريريّة ودعْمٍ أسري، ولمُشارَكتهم في دراسات الكسوف، بينما كانت ديبورا تبلغُ من العمر ستةَ أشهر، وإلواز عامَيْن ونصفَ العام.

مصادر الصور

يودُّ المؤلِّفان والناشِرون الإعرابَ عن شُكرهم إلى المصادر التالي ذِكْرها على تقديمِ الموادِّ الإيضاحية ومَنْحِ الإذنِ بإعادة نشْرِها.

American Museum of Natural History Library, New York: 60; from H. W. Babcock, 1961, The Astrophysical Journal, cxxxiii/572 (© aas, reproduced with permission): 24; © Wendy Carlos 2001 from individual images © 2001 by Jay M. Pasachoff: 61; © 2008 Miloslav Druckmüller, Peter Aniol, Martin Dietzel and Vojtech Rušin: 51; esa/nasa/ soho with the lasco, nrl: 58; esa/nasa/swoops: 76; from Joseph Fraunhofer, Bestimmung des Brechungs- und Farbenzerstreuungs- Vermögens verschiedener Glasarten (Munich, [1817]): 35; from Galileo Galilei, Istoria e Dimostrazioni Intorno Alle Macchie Solari e Loro Accidenti [History and Demonstrations Concerning Sunspots and their Properties] (Rome, 1613): 3; from William Gilbert, De Magnete, Magnetisque Cororibus et Magno Magnete (London, 1600): 7; L. Golub drawings/diagrams: 8, 11, 12, 22, 23; L. Golub and nasa/gsfc/sdo: 69; L. Golub (sao), Eberhard Spiller (ibm), and nasa: 65; gong/nsa/aura/nsf: 13, 15; gsfc/sdo/aia, sao and lmsal: 62; from G. E. Hale, 1908, The Astrophysical Journal, xxviii/100 (© aas, reproduced with permission): 5; from G. E. Hale, 1919, The Astrophysical Journal, xlix/153 (© aas, reproduced with permission): 6 (top): from Edmond Halley, A Description of the Passage of the Shadow of the Moon, over England, in the Total Eclipse of the Sun, on the 22d. Day of April 1715 in the Morning (London, 1715): 55; from Edmond Halley, Tabulæ Astronomicæ,

Accedunt de Usu Tabularum Præcepta (London, 1749): 19; courtesy David Hathaway, nasa/arc: 20, 26; courtesy of Frank Hill, the noao and the nso/gong: 10; Hubble Heritage Team (aura/stsci, C. R. O'Dell (Vanderbilt), nasa /esa: 85; jaxa/nasa/esa Hinode/eis: 70; jaxa/nasa/esa/sao: 17; jaxa/nasa/Hinode sot, lmsal: 47, 48; Ruth Kneale/ nso/nsf: 50; Serge Koutchmy, Institut d'Astrophysique, Paris/cnrs: 49; Serge Koutchmy and E. Tavabi, Institut d'Astrophysique, Paris and Sorbonne University: 46; Françoise Launay, Institute d'Astrophysique, Paris/cnrs: 43; Marshall Space Flight Center (nasa): 66; image processing by Christoforos Mouraditis: 42; Museum of Jurassic Technology, Culver City, California: 44, 59; N. A. Sharp (now nsf) National Solar Observatory; noao/nso/Kitt Peak fts/aura/nsf: 36, 37; nasa: 67, 98; nasa/esa/soho/mdi: 14; nasa/esa/soho/mrl: 78, 79; nasa/gsfc/ Magnetospheric Multiscale (mms) Mission: 80; nasa/gsfc/maven: 82; nasa/ gsfc sdo: 97; nasa/gsfc/sdo/aia: 72, 96; nasa/jpl-Caltech/gsfc/jaxa: 71; nasa/msfc/stereo: 83; nasa/sdo/aia: 73, 77; nasa/sdo, aia and hmi: 68; nasa/sdo/aia/lmsal: 75; nasa sdo/aia and sdo/hmi/Stanford- Lockheed Institute for Space Research: 74; nasa/sdo/Stanford Lockheed Institute for Space Research/hmi: 21; nasa/voyager, jpl- Caltech: 84; Natural Resources of Canada, Geological Survey of Canada: 18; National Center for Atmospheric Research/High Altitude Observatory (ncar/hao)/Mauna Loa Solar Observatory, courtesy of Joan Burkepile: 57; from Isaac Newton, Opticks: or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light (London, 1704): 29; nso/aura/nsf: 5 (bottom); Deborah D. Pasachoff: 86, 88a, 88b, 89; photos Jay M. Pasachoff: 28, 32, 33, 52; photo Jay M. Pasachoff (courtesy of Wellesley College): 30; Jay M. Pasachoff, Allen B. Davis, and Vojtech Rušin, with processing by Miloslav Druckmüller: 39; from Jay M. Pasachoff and Alex Filippenko, The Cosmos: Astronomy in the New Millennium, 4th edn (Cambridge, 2014): 15, 38; Jay M. Pasachoff, composite by Leon Golub: 94; Jay M. Pasachoff, composite by Muzhou Lu, http://totalsolareclipse.org: 95; collection of Jay and Naomi Pasachoff: 3, 19, 31, 35, 40, 41; Jay and Naomi Pasachoff Collection, on deposit at The Chapin Library, Williams College; images courtesy of Wayne Hammond: 7, 29, 54, 55; Jay M.

Pasachoff, Glenn Schneider, Dale Gary, Bin Chen, and Claude Plymate at the Big Bear Solar Observatory, New Jersey Institute of Technology: 1; Jay M. Pasachoff, Williams College Eclipse Expedition; funded in part by the Committee for Research and Exploration of the National Geographic Society, http://totalsolareclipse.org: 93; from [Jacob Pflaum], Usum huius opusculi breviter exponemus. In principio offert se calendarium in 12 menses partitum (Ulm, 1478): 54; Stephen W. Ramsden, Charlie Bates Solar Astronomy Project: 45; from P. A. Secchi, Die Sonne: die wichtigen neuen Entdeckungen über ihren Bau, ihre Strahlungen, ihre Stellung im Weltall und ihr Verhaltniss zu den ubrigen Himmelskorpern (Braunschweig, 1872): 40; Ralph

Smith, Cairns, Australia: 4; soho (eit), esa/nasa: 27; courtesy of the soho/mdi consortium: 9; Space Weather Prediction Center, noaa/nws: 81; Swedish Solar Telescope (Swedish Research Council): 2; Aris Voulgaris of the Aristotle University of Thessaloniki, Greece, as part of the Williams College Eclipse Expedition, supported by a grant from the Committee for Research & Exploration of the National Geographic Society: 42, 56; Wikipedia/Mika Hirai, Williams College, modified from Bhamer, public domain: 63; Williams College- Hopkins Observatory http://astronomy.williams.edu/hopkins-observatory/eclipse- viewers/, from the collection of Luke Cole, donated by Nancy Shelby: 87, 91, 92; from William Hyde Wollaston, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, lxxxxii (January 1802) [Fig. 3/Plate xiv, p. 380]: 34; from C. A. Young, The .Sun (New York, 1881): 41

الفهرس

«الكون» 192

الأب أنجيلو سيكي 112

ابن الهيثم 86

الاتحاد الفلكي الدولي 20

إتش دبليو نيوتن 189

أحداث إعادة الاتصال 210

أحزمة الإشعاع 172

أحزمة فان آلن 172

اختراق حاجز الصوت 220

اختلاف المنظور 137

الإدارة الوطنية للمحيطات والغِلاف الجوي 211، 213

إدموند هالي 59، 110، 133

أدنى نشاطٍ للبُقَع الشمسية 63، 111، 153

إشعاع الجسم الأسود 101

الأشعة السينية 122، 166، 169، 177، 181

الأشعة السينية، الانبعاث 141، 154، 177، 178

الأشعة السينية، فيلم 227

الأشعة الكونية 173، 222

الأشعة الكونية الشمسية 222

الأشعة الكونية المَجَرِّيَّة 222

الأشعة تحت الحمراء 17، 93، 104، 141، 154، 155، 157، 173، 176، 227، 228، 258

الأشعة فوق البنفسجية 98، 119، 122، 123، 127، 144، 154، 162، 176

الأشعة فوق البنفسجية، التصوير 170، 179، 213، 214

الإكليل الشمسي 8، 86، 108، 111، 115، 121 - 132، 135 - 157، 166 - 188، 191 - 214، 237 - 241

الإكليل الشمسي، الأشعة السينية 141، 144، 155، 166، 169، 177، 181

إدوارد أبلتون 161

إدوارد سابين 188، 191، 192

إدوارد فرانكلاند 115

آرثر شوستر 197

آرثر كينيلي 159

إرفين شرودنغر 89

إرنست كراوس 162

أرنولد سومرفيلد 72

إسحاق نيوتن 81 - 84، 88، 91، 94، 95، 115

أسرة شانغ الحاكمة 13

أسرة هان الحاكمة 14

الإكليل الشمسي، الأشعة فوق البنفسجية القصوى 123، 141، 162، 169، 170، 176 - 179

الإكليل الشمسي، البلازما الإكليلية 153، 179، 200، 203، 204

الإكليل الشمسي، الثقب الإكليلي 202، 203، 206

الإكليل الشمسي، الطيف الإكليلي 141، 142

الإكليل الشمسي، المجال المفتوح 200، 203، 204، 207

الإكليل الشمسي، درجة الحرارة 126، 127، 144، 167، 177، 181

البلازما، انظر أيضاً: الإكليل 27، 28، 143، 153، 171، 178، 181، 200، 203، 204، 224

بلفور ستيورات 188

بول إهرنفست 73

ألبرت أينشتاين 72، 82، 89، 92
ألكسندر فون هومبولت 61، 188، 190، 191
ألكسندر ويلسون 17، 18
إليزابيث ليفيس 192
إليوتير مانسكار 98
انبعاث الخيوط 12، 27، 199
الانبعاثات الكتلية الإكليلية 190، 199، 207، 214
الانتشار المضطرب 183
أندرس سلسيوس 187
أندريه ماري أمبير 32
آني جَمب كانون 104
آني سكوت ديل راسل 195
آني ماندر 194، 196
اهتزازات الدقائق الخمس 49
أو بي هيورتر 187
أوغست كونت 99، 100
أوغستان فرينل 88
أوليفر هيفسايد 159
إيمانويل كانط 30
بيتر زيمان 20، 21، 22
بينغت إدلين 142
بيير غاسندي 87
تأثير زيمان 22، 23
تأثير كوريوليس 67
تجارب النيوترينو 54
التجربة الحاسمة 81
التحليل الطيفي 100، 101، 103، 113، 114، 141، 167، 181
تشارلز أوغست يونغ 113
تصوير الاختلاف 45، 47
التصوير المقطعي 41
تفاعُل البروتون- البروتون المتسلسِل 53
تلسكوب أبولو المُثَبَّت 174
تلسكوب الأشعة السينية 169، 180
تلسكوب الأشعة السينية للطيف العادي (نيكست) 169، 170
تلسكوب التحليل الطيفي النووي (نوستار) 180
التلسكوب الشمسي الجديد 6
التلسكوب الضوئي الشمسي 122

برنار ليو 145

بَرْنامج فانغارد 172

برونو بونتيكورفو 54

بطارية الزنك والكربون 100

بعثة الغِلاف الجوي والتطوُّر المتقلِّب
للمريخ (مافن) 213، 214

البقع الشمسية، الرصد 13، 16، 27، 34

البقع الشمسية، دورة 13، 16، 56، 60 - 67

البقع الشمسية، والاضطراب الأرضي المغناطيسي 62، 188، 192، 197

البقع الشمسية، ومنطقة شبه الظل 12، 27، 34

تلسكوبُ تصويرِ الأشعة فوق البنفسجية القصوى، انظر أيضاً: مرصد سوهو 56، 181

تلسكوب دانيال كيه إينوي الشمسي 128، 129

تلسكوب ريتشارد دُن الشمسي 119

تلسكوب مرصد مكماث- بيرس الشمسي 22

تلسكوب هابل 224

التلسكوبات 9، 14، 18، 19، 27، 82، 91، 119، 122- 125، 128، 145، 155، 169، 177، 228، 248

التلسكوبات وغاليليو 14

التلسكوبات ونيوتن 82

التلسكوبات، انظر: مرصد يركيس 18

التلسكوبات، مرصد بالومار 19

خرزات بيلي 239

الخط D3 115، 117

الخط K 120

توماس يونغ 87، 88

التوهج الشمسي 110، 120، 124، 179 - 181، 192

التيارات الكهربية الشَّفقية 189

تيارات بيركلاند 198

تيخو براهي 49

جاك إيدي 111

جامعة خاركوف 73

الجمعية الفلكية الأمريكية 141، 143

الجمعية الفلكية الملكية 61، 189، 196، 197

الجمعية الملكية 110، 193، 259

جهازِ تصوير ميكلسون- دوبلر 71

جورج الثالث، ملك بريطانيا العظمى 17

جورج إليري هيل 18، 19

جورج باتشيلور 76

جورج بيدل آيري 110، 194

جورج غراهام 187، 188

جوردانو برونو 24

الخط الطيفي للكالسيوم 98، 119، 141، 229

خط الهيليوم 117 ،115 D3

خط انبعاث ليمان- ألفا 123

خطوط الانبعاث 101، 113 - 117، 143، 167، 168، 179

خطوط فراونهوفر 97 - 102، 115، 116

دبليو إم إتش غريفز 189

دوبلغرام 47

الدوران التفاضلي 52، 65، 66، 183

الدورة الشمسية 63

الدورة الشمسية الدُّنيا 61

الدورة الشمسية العظمى 61

الدورة الشمسية والانعكاس المغناطيسي 64، 76

الدورة الشمسية والمجال الحلقي 66 - 69، 76

الدورة الشمسية والمجال القطبي 66 - 69، 76

الدورة الشمسية وقانون هيل 64

الدورة الشمسية ومخطط الفراشة 63

دورة النشاط الشمسي 70، 153

دونالد إتش منزل 271، 272

الدينامو 64، 65، 70، 77، 183، 214، 260

الدينامو المغناطيسي 214

جوزيف فراونهوفر 96 - 99
جول يانسن 113، 114
جوليان بارتلز 189
جون بيكهام 86
جون فلامستيد 110
جيمس فرانك 72
جيمس كلارك ماكسويل 115، 158
جيوفاني ماريا ماركوني 158، 159
الحبيبات الشمسية 6، 12، 27، 28، 35
الحبيبات الفائقة 48، 50، 68، 71
الحبيبات الفائقة 48، 50، 68، 71، 120
حجر المغناطيس 186
الحَمل الحراري 6، 27 - 33، 52، 65، 66، 183
خدمة الطقس الوطنية 211
ذيل المذنَّب 220
الرادار 162
رسم بياني زمني 196
الرصد الفضائي 9، 62، 113، 116، 121، 162، 174، 176، 180، 185
الرصد الفضائي، رصد الشمس 174، 180، 185
روبرت بنسن 99، 100
روبرت بي لايتون 44 - 47، 65، 68، 76، 183
روبرت واتسون- وات 162
الرياح الشمسية 8، 173، 198، 200، 203، 205 - 207، 210، 212، 214، 215، 218 - 223

ريتشارد دُن 119

ريتشارد ديسكون أولدهام 37 - 41، 52

ريتشارد فاينمان 45، 90

ريتشارد كارينغتون 188، 192

ريتشارد لارمور 197

رينيه ديكارت 91

زلزال 37 - 39، 41، 42

الزهرة 173، 220

ساتورن 5 173

سبوتنيك 1 171

سبوتنيك 2 172

سديم الجبار 223

سفانت أرهنيوس 197

سيدني تشابمان 189، 190، 260

سير وليام هيرشل 17

سيرجي كوروليف 171

سيسيليا باين- غابوشكين 103، 140

شبائك التشتت 261

109، 111 - 117، 126، 145 - 147، 167، 168، 176، 229، 238

الشمس، الكسوف، انظر: الكسوف الشمسي 9، 27، 110، 112

الشمس، المنطقة الانتقالية 122، 126، 127

الشمس، النطاق الداخلي 28، 51، 66

الشمس، النماذج الشمسية 49، 59، 64، 65، 66، 70، 183

الشمس، درجة حرارة السطح 126، 127، 144، 167، 177، 181

شواب والبحث عن فولكان 61، 259

الشواظ الشمسي 109 - 112، 114، 116، 138، 234

الشويكات 120، 121، 122، 124، 125، 127، 176

صاروخ حامل 248

صدمة النهاية 221

صموئيل كليمنس 163

صواريخ السَّبْر 141، 162، 163، 164، 169

صواريخِ السَّبْر، الإطلاق 163، 164، 169

صواريخِ السَّبْر، مُنشأة «وايت ساندز ميسايل راينج» 164، 165، 166، 169

شركة الهند الشرقية البريطانية 24

الشكل البيضاوي للإكليل 153

الشمس، الانتشار المضطرب 183

الشمس، التركيب 37

الشمس، التوهج الشمسي 110، 120، 124، 179، 180، 181، 192

الشمس، الحجم 7، 39، 106

الشمس، الدوران التفاضلي 52، 65، 66، 183

الشمس، الرياح الشمسية 8، 173، 198، 200، 203، 205 - 207، 210، 212، 214، 215، 218 - 223

الشمس، السطوع 13، 29، 30، 35، 106، 114، 128، 132، 145، 150، 188، 198، 199، 208

الشمس، الطيف الشمسي 18، 95، 97، 103، 128، 142، 167

الشمس، الغلاف الضوئي 6، 29، 32، 50، 97،

صواريخ أيروبي 165، 262

الضوء 13، 20 - 29، 49، 50، 62، 79 - 93، 101، 116، 141 - 145، 157، 159، 161، 168، 176، 177، 192، 227، 228، 233، 257، 261

الطاعون 24

طبقة القص 53، 66

طبقة كينيلي- هيفسايد 160

الطقس الفضائي 211، 212

الطقس الفضائي، التنبؤات 211

الطيف الشمسي 18، 95، 97، 103، 128، 142، 167

الطيف الومضي 115

العاصفة المغناطيسية 192، 196
عبور عطارد 60، 87
العصر الجليدي الصغير 15
علم الرجفات الشمسية 49، 51
علم الزلازل 38
عملية «مشبك الورق» 165
عملية السَّبْر 163
عن المغناطيس 24، 57
غاليليو غاليلي 14، 15
غريغوري بريت 161
الغِلاف الأوسط (الميزوسفير) 163
الغلاف الأيوني (الأيونوسفير)
الغلاف الأيوني (الأيونوسفير)، الطبقة D 161
الغلاف الأيوني (الأيونوسفير)، الطبقة E 161
الغلاف الأيوني (الأيونوسفير)، الطبقة F 161
الغلاف الجوي 29، 92، 97، 105، 112، 116 - 123، 137، 153 - 157، 162 - 175، 198، 200، 211، 214
الغِلاف الجوي السفلي (التروبوسفير) 162، 163
الغِلاف الجوي الطبقي (الستراتوسفير) 162، 163
الغلاف الشمسي، الحافة 164، 218، 221
الغلاف الشمسي، الصدمة القوسية 223
الغلاف الشمسي، الغشاء 221
الغلاف الشمسي، صدمة النهاية 221
الغلاف الضوئي 6، 29، 32، 50، 97، 109، 111 - 117، 126، 145 - 147، 167، 168، 176، 229، 238
الغلاف الضوئي، التركيب 97
الغلاف الضوئي، الحبيبات 12
الغلاف الضوئي، الطيف 116، 117
الغلاف الضوئي، حركة خلايا الحَمل 32
الغلاف الضوئي، درجة الحرارة 126
الغلاف اللوني 109 - 120، 124، 128، 176، 235، 241
الغِلاف المغناطيسي 198
الغِلاف المغناطيسي الأرضي 198
غوستاف كيرشوف 99، 100، 101
الفاصل المغناطيسي 210
فرانسيس بيلي 111، 133
فردريك جوليو 74
فرع أبحاث مسبار الرصد الصاروخي 162

الغلاف الجوي، اختبار الظروف 176
الغلاف الجوي، السُّمك 161، 162
الغلاف الجوي، الغلاف الجوي الشمسي 20، 97، 98، 103، 109، 111، 174، 176
الغلاف الجوي، تدفق الهواء 67
الغـلاف الجـوي، حـرارة الغـلاف الجـوي الشمسي 108، 109، 127، 168
الغلاف الجوي، حرارة النجوم 105
الغلاف الجوي، دورات 30
الغلاف الجوي، عدم النفاذية 173، 174
الغلاف الجوي، مدى 158
الغلاف الحراري 163
الغلاف الخارجي 163
الغلاف الشمسي 8، 62، 149، 215، 217
فريدريش غاوس 191
فريدريك شيلن 30
فلهلم فين 72
فلهيلم فيبر 191
فولفغانغ باولي 74
فوياجر 1 217، 221، 222
فوياجر 2 221، 222، 263
فيرنر فون براون 165، 172
فيرنر هايزنبرغ 89
قاعدة كيب كانافيرال 217
قانون ستيفان- بولتزمان 88
قانون فين للإزاحة 88
قانون هيل 64
قمر الرصد البيئي العامل ذو المدار الثابت 213
القمر الاصطناعي «إكسبلورر 1» 172
لورد كلفن 193

كارل ساغان 97

كارل غوستاف روسبي 75

كاميرا تصوير بالأشعة فوق البنفسجية القصوى 214

كتاب «البصريات» 81

كتاب «الجزء البصري من علم الفلك» 135

كتاب «تناغُم العالَم» 86

كتاب «روزا أورسينا» 87

كتاب «علم الفلك الجديد» 86

كتاب «نظرية الألوان» 81

كريستوفر شاينر 87

كريستيان بيركلاند 189، 197، 198

كريستيان هوغنس 81، 84، 87

الكسوف الشمسي 9، 27، 110، 112

الكسوف الشمسي الجزئي 132، 133، 238، 239

الكسوف الشمسي والتقنيات الحاسوبية 152

الكسوف الشمسي وكبلر 135

لويس الرابع عشر 15

لويس جاك ماندي داغير 150

لويس دي بروي 72

ليو، عوائق ليو 145

ليو، مرسام الإكليل 145

ليو، مرشحات ليو 145

مارغريت هاغينز 78

مارك توين 163، 164

مارينر 2 190

ماكس بلانك 88، 89

مائع 27 - 33، 51

مايكل فاراداي 32

المتحف الوطني للطيران والفضاء 174

المجال المغناطيسي 23، 32 - 34، 47، 57 - 59، 68 - 70، 76، 77، 153، 172، 178، 179، 187، 199 - 203، 208، 210

المجال المغناطيسي الأحادي القطب 201، 203

المجال المغناطيسي الثنائي القطب 66، 67، 178، 187، 201

مجال مغناطيسي ثنائي القطب 66، 67، 178، 187، 201

المجلة الفيزيائية الفلكية 19، 20

الكسوف الشمسي، التصوير 237 - 245

الكسوف الشمسي، المشاهدات 27، 110 - 116، 131 - 138، 191

الكسوف الشمسي، المشاهدة الآمنة 9، 13، 132، 225 - 231، 233 - 235

الكسوف الشمسي، تأثير الحلقة الماسية 239

الكسوف الشمسي، مشروع «ميغاموفي» 242

الكشفَ عن موجاتِ الراديو وتحديدَ مَداها، انظر أيضًا: الرادار 162

كلية ترينيتي بجامعة كامبريدج 82

كلية غيرتون 195

كلية ويلسلي 78

الكورونيوم 140، 141، 167

كوكبة الجبار 223

لا سلكي ماركوني 159

لودفيغ بيرمان 190

مجمع التصوير الجوِّي 126، 156، 181، 201، 250

مجموعةِ الشبكة العالمية للتذبذُب 47

المجموعة الشمسية 62، 179، 203، 205، 212، 214، 217، 221، 222

محطة سكاي لاب 173، 174

محطة مرصد المنسوب المرتفع 146

مختبر أبحاث البحرية الأمريكية 147، 148، 149

مخطط الفراشة 63

مخطَّط هرتزشبرونغ- راسل 107

مخططات فاينمان 90

مدرسة الفلسفة الطبيعية 30

المذنَّب ماكنوت 220

مرسام الإكليل 146 - 149، 208

مرسام الإكليل الطيفي الواسع الزاوية (لاسكو) 148

مرسام الطيف 18، 102

مرسامَ الطيف الشمسي 18، 188

مرصد الشمس وغِلافها (سوهو) 71، 74، 147 - 149، 208، 209

المرصد الشمسي المداري 173

مرصد العلاقــات الأرضية الشمسية (ســتيريو) 148، 149، 220

المرصد الوطني للطاقة الشمسية في كيت بيك 22، 102

مرصد بالومار 19

مرصد بلو هيل 75

مرصد بيغ بير الشمسي 6، 124، 125، 272

مرصد ديناميكا الشمس 122، 126، 148، 156، 171، 201، 202، 207، 212 - 214، 250 - 253

مرصد ساكرامنتو بيك في نيومكسيكو 119، 121، 123

مرصد كلية هارفارد 104، 120

مشكلة النيوترينوات الشمسية 53

مصفوفة جانسكي البالغة الكِبَر 154

المصور الإكليلي العالي الدقة 169

مصور الغلاف الجوي 149

مصور الغلاف الشمسي والمغناطيسي 149

مِطْياف تصويــر الأشــعة فــوق البنفســجية القصوى، انظر أيضاً: مرصد هاينود 180

مِطْياف تصوير المنطقة البينية 127

معهد سميثسونيان 174، 271

مغنيت 24

مغنيسيا 24

مقدمة الموجة 88، 259

مقياس الزلازل 39

الملك الشمس 15

مناخ 24

مناخ المريخ 214

المناطق الغامضة 185، 189

مرصد كيو 192، 194

مرصد ماونت ويلسون الشمسي 18، 19

مرصد هاينود 56، 122، 124، 125، 180، 181

مرصد يركيس 18

المركبة الفضائية 122، 123، 141، 147، 149، 180، 181، 204، 205، 209، 217، 223، 248، 250

مركز تنبُّؤاتِ الطقس الفضائي 212

مركز غودارد لرحلات الفضاء 122، 149، 271

مركز كينيدي للفضاء 205

مرلي توف 161

مستكشف التكوين المتقدم 209

مُستكشـفُ المنطقـــة الانتقاليـــة والإكليـــل الشمسي، (تريس) 122

منزل 60، 220، 259

المنطقة الانتقالية 122، 126، 127

منطقة الحَمل الحراري 52

منطقة الظل 33، 34

منطقة شبه الظل 12، 27، 34

منظمة استكشاف الفضاء اليابانية 262

المَهمَّة أوليسيس 204، 205

الموجات الزلزالية 39، 52

الموجات الزلزالية، الموجة الأولية أو الطولية (الموجة P) 39، 41، 42

الموجات الزلزالية، موجات السطح 39

الموجات الزلزالية، موجة القص (الموجة S) 39، 41، 42

موجة انضغاطية 40، 50

مونغكوت ملك سيام 138

ميلوسلاف دروكمولر 152، 153

ناسا 122، 127، 148، 149، 165، 170، 172، 173، 180، 204، 253

النَّجْم أوريونس 224

النسق الأساسي 106

النشاط الشمسي 70، 153

نموذج terella 57

نموذج دينامو بابكوك- لايتون 65

نورمان لوكير 114، 115، 116

نيلز بور 89

النيوترينو 52، 53، 54

نيوترينو الإلكترون 54

النيوترينوات الشمسية 53، 54

هارولد زيرين 124، 125، 272

هانز ألفين 126، 198

هانز كريستيان أورستد 30

هاينريش شواب 60 - 62، 188، 192، 259

هربرت فريدمان 169

هرمان فون هلمهولتز 158

هنري جيليبراند 58

هوارد راسل بتلر 150

الهيليوم 52، 53، 113 - 117، 138، 140، 167

هيئة المساحة الجيولوجية الهندية 37

وارن دي لا رو 112

والتر غروتريان 143

والتر ماندر 188، 194، 196

والتر موريس إلساسر 71 - 77، 260

الوسط بين النجمي المحلي 215

وليام إليس 188، 193، 194

وليام جيلبرت 24، 26، 57

وليام رامزي 117

وليام كريستي 194

وليام هاغينز 78

وليام هايد ولاستون 95، 99

ويندي كارلوس 153، 154

يوجين باركر 70، 190، 218

يوهان جوليوس فريدريش بيركوفسكي 150

يوهان فولفغانغ فون غوته 81

يوهانس كبلر 49، 86، 87

هوراس دبليو بابكوك 45، 65

هيرو السكندري 85

1. ظهرتْ نسخةٌ مبكرة من هذا الفصل في كتاب «Making Sense: Beauty, Creativity and Healing»، تحرير باندي لي، ونانسي أولسن، وتوماس بي دافي (نيويورك، 2015). ↑

2. تحقَّقَ اكتشافُ هيرشل على نحوٍ مذهل: كان هيرشل يحاوِلُ قياسَ مقدارِ طاقةِ ضوء الشمس عند أطوالٍ موجية مختلفة. وفعَلَ هذا عن طريق تمريرِ شعاعٍ من ضوء الشمس عبرَ موشورٍ وفصْلِه إلى الألوان المكوِّنة له. وبعد ذلك حرَّكَ ترمومتراً عبر الطيف لقياسِ مدى دِفْئِه، وأيضاً لقياسِ مقدارِ الطاقة الآتي من الشمس في كلِّ طولٍ موجي. ووجَدَ أنَّ الضوءَ الأحمر من الشمس أدى إلى تدفئةِ الترمومتر أكثرَ مما فعَلَ الطولان الموجيان الأصفر والأزرق، وفسَّرَ هذا بأن الضوءَ الأحمر يمتلكُ طاقةَ تدفئةٍ أعظمَ كثيراً. وما اكتشفه في واقعِ الأمر أنَّ مقدارَ الطاقة الشمسية المنبعِث في الضوء الأحمر يَفُوق ذلك المنبعِثَ في الضوء الأزرق. وقُوبِل تقريرُه عن هذه المشاهَدة بالتكذيب؛ لذا أعادَ تنقيحَ التجرِبة بإضافةِ ترمومترِ ضبطٍ خارجَ الشعاع الضوئي المار عبر الموشور لاستبعادِ التدفئة الكلية للغُرْفة نفسها. وأجرى بعدَ ذلك قياساتٍ أيضاً خارجَ نطاقِ الضوء المرئي، في موضعٍ وراء اللون الأحمر حيث لا يوجد شيءٌ مرئي للعين. ووجَدَ أن الترمومتر ازدادَ دِفْئاً هناك أيضاً، بل وفَاقَ ما سجَّلَه من دِفْءِ ذلك الذي سجَّلَه داخلَ الضوءِ الأحمر نفسه، وبعدَ عدةِ قياساتٍ متكررة خَلص إلى وجودِ ضوءٍ وراءَ نهايةِ اللون الأحمر، غيرِ مرئي بالنسبة لنا، لكنه يحتوي على قدرٍ كبير من الطاقة. وهذه المنطقةُ من الألوان الموجودة وراءَ اللونِ الأحمر تُعرَف الآنَ باسمِ الأشعة تحت الحمراء. ↑

3. بينما كان أحدُنا (ليون غولوب) لا يزال باحثاً شاباً في سبعينيات القرنِ الماضي، أخبره شخصٌ ما أنَّ من الصعب القيامَ بأيِّ شيءٍ جديد لم يَقُم به هيل بالفعل منذ ستين عاماً مضت. لقد ظنَّ أن هذا التعليقَ مجردُ مَزْحة، ولكن اتَّضحَ له بعد ذلك أن تلك حقيقةٌ فعلية. ↑

4. من الممكن أن نَعُدَّ بعضَ المواد الصلبة اللدنة، مثل حلوى الطوفي، سوائلَ أيضاً، لكن سيُصبِح هذا الأمرُ صعباً بعضَ الشيء؛ إذ إن سرعةَ التشوُّه تصبح عاملاً مهماً. فالمعجونُ السيليكوني سيتشوَّه ببطءٍ تحتَ تأثير الجاذبية، لكنه سيرتدُّ كمادةٍ صلبة عند دفْعِه سريعاً (عند ارتطامِه بالأرضية على سبيل المثال). ↑

5. ما الذي يولِّد الموجة؟ لا بدَّ من توافُر شيئَيْن: اضطرابٌ وقوة استعادةٍ. على سبيل المثال، يُضرَب وترُ البيانو بمطرقةٍ يحرِّكها أحدُ المفاتيح، وهو ما يسبِّب إزاحةَ الوترِ من وضعيةِ

السكون التي كان عليها. لكن الوترَ خاضعٌ للتوتر؛ لذا فإن هناك قوةً تجذبُ الوترَ مجدداً إلى وضعيةِ السكون. تنتشرُ حينئذٍ موجةٌ عبرَ الوترِ من البُقْعة التي ضُرِبت بالمطرقة، وسرعان ما يتحرَّك الوترُ بأكمله للخلف كلَّ المسافة على امتدادِ طوله. من دونِ اضطرابِ المطرقة لن تتولَّدَ موجة، ولكن أيضاً من دونِ قوةِ الاستعادة، سيزيحُ الاضطرابُ الوترَ فقط ولن يهتزَّ شيءٌ بعدَ ذلك. إن الموجةَ التي تنتشر نتيجةً للاضطراب تتحرَّكُ بسرعةٍ معينة، تُعرَف بشكلٍ عام باسمِ سرعة الصوت، وتعتمدُ على كميتَيْن: شدةِ قوة الاستعادة، وكتلةِ الوَتر. فالوترُ السميك والثقيل للغاية يَخضعُ لتوتُّرٍ ضعيفٍ وسيهتزُّ ببطء، ويزيدُ شدُّ الوترِ من قوةِ الاستعادة ويغيّر معدلَ الكتلة إلى قوةِ الاستعادة. ويتسبَّب هذا في زيادةِ سرعةِ الصوت؛ الأمر الذي بدوره يجعلُ الوترَ يهتزُّ بسرعةٍ أكبر، وبهذا يزدادُ التذبذُب. ↑

6. التثليث triangulation هي عملية تُستخدَم في إيجاد إحداثيات نقطة ما عن طريق قياس الزوايا بين نقطتين مرجعيتين (المترجم). ↑

7. يَقْتفي العلماءُ أحياناً أنَسَابَهم عبر سلسلةٍ من مستشاري الأطروحات. فعن طريق مستشارِ رسالة الدكتوراه للايتون، ويُدعى وليام فيرميليون هوستن William Vermillion Houston، اكتُشِف أن لايتون ينحدر أكاديمياً من مستشارَي الدكتوراه روبرت ميليكان Robert Millikan وألبرت مايكلسون Albert Michelson، وكلاهما فازا بجائزة نوبل. ↑

8. تخيَّل موجةً تنتشر على شكلِ سلسلةٍ من القِمَم، مثل موجاتِ المحيط التي تضربُ الشاطئ. يكون اتجاهُ مقدمةِ الموجة مُتعامِداً على اتجاهِ الانتشار. وتتحرَّكُ سلسلةُ القِمَم إلى الأمامِ وتُواجِه، بزاوية، خطاً حدودياً تتقدَّم عنده القِمَمُ فجأةً بمزيدٍ من البطء. وعندما تصلُ قمةُ الموجة الأولى إلى الخط، يتباطأ الجزءُ الذي يَضربُ الخطَّ منها، في حين يُواصِلُ باقي القمةِ التحرُّك إلى الأمام. والنتيجةُ تكون انحناءً في الصف، وفي النهاية انحناء للخط بالكامل. الأمرُ أشبهُ بقيادةِ سيارةٍ لها مَكابِحُ في الناحية اليُمنى فقط. فعندما تَضغطُ بقدَمِك على بدَّالِ المكابح يُبطِئ الجانب الأيمن ولكن يُواصِل الجانبُ الأيسر المُضيَّ قُدماً. والنتيجةُ أن السيارةَ تنحرفُ جهةَ اليمين. ↑

9. الأنواع الثلاثة هي: نيوترينوات الإلكترون (electron neutrinos)، ونيوترينوات الميون (Muon neutrino)، ونيوترينوات التاو (tau neutrino) (المترجم). ↑

10. ثَمةَ لغزٌ ما يَكتنِف النسخةَ الرائجة من القصة التي يُزعم فيها أن شواب كان يبحث عن كوكب فولكان. فقد بدأ رَصْد الشمس في عام 1826، وفي عام 1840 أقنَعَ عالِمُ الرياضيات والفيلسوف فرانسوا أراغو زميلَه أوربان لوفيرييه Urbain Le Verrier بالبدء في دراسةِ الحركة المدارية لعُطارد، وبعدَ انقضاءِ الكثير من السنوات، في عام 1859، اقترحَ وجودَ كوكبٍ داخلي يُدعى فولكان من أجلِ تفسيرِ التناقُض بين حساباتِه والحركةِ المرصودة لعُطارد. لذا فإن التفسيرَ الذي عادةً ما يبرِّر سببَ دراسات شواب لا يتوافق مع التوقيت، المتأخِّر بحوالي ثلاثة عقود. في الواقع، يُعَد اقتباسُ الجمعية الملكية

الذي كتَبَه السيدُ جونسون في عام 1857 أدق: «لا أدري ما الدافعِ الذي حفَّزَه في المقام الأول، سواء أكان آراءً معيَّنة طرحتْ نفْسَها على عقله، أم أنه كان رغبةً عامة في إجراءِ تَقَصٍّ كاملٍ لم يَسْبقه إليه أسلافُه لقوانين ظاهرة مذهلة اعتاد الجميعُ منذ زمنٍ بعيد إهمالها». ولم يَأتِ على ذِكر فولكان أو أي كواكبَ داخليةٍ أبداً! ↑

11. من النقاط المهمة، أن مجالات البُقَع الشمسية ليستْ موازيةً تماماً لخط الاستواء، بل تَنزعُ إلى أن تكونَ مائلةً بعض الشيء، بحيث تكون البُقَع الأمامية أقربَ إلى خط الاستواء مُقارَنةً بالبُقَع المتأخرة. والبُقَعُ في دوائرِ العرض العليا مائلةٌ أكثر من البُقَعِ التي في دوائر العرض الدنيا؛ ويُعرَف هذا الترابُط باسم «قانون جوي». ↑

12. الطريقةُ التي يتسبَّب بها الدورانُ الأسرع لخطِّ الاستواء في استطالةِ المجالات المغناطيسية التي ظهرتْ على السطح يُمكِن رؤيتها كذلك في تسلسُلِ الصور الموضَّح في الشكل 72؛ إذ تتَّخِذ المَعالِمُ الرأسيةُ التوجُّهِ، مثل الثقوب الإكليلية، شكلَ الحرف V بعدَ عدةِ أشهُرٍ نتيجةً للدوران التفاضُلي. ↑

13. بالنسبة إلى أولئك الذين يؤيدون سيدني تشابمان، أذكرُ أنه دعم في أواخر أربعينيات القرن العشرين وجهةَ نظرٍ حول المغناطيسية الأرضية والشمسية قائمةً على اقتراحٍ أدلى به بلاكيت Blackett وغيره، يفيد بأن العلاقةَ بين العزمِ المغناطيسي والزخمِ الزاوي لجسمٍ يدور تمثِّل «خاصيةً جديدة وجوهريةً للمادة الدوَّارة». وفي بحث تشابمان عن المغناطيسية الشمسية الذي نُشر عام 1948، لم يأتِ على ذِكر إلساسر أو حتى نماذج الدينامو كما نعرفها على الإطلاق، ويؤكِّد تمهيدُ الطبعةِ الثانية من الكتاب الذي نشره بالتعاون مع جوزيف لارمور في عام 1948، ويحمل عنوان «المغناطيسية الأرضية» (Geomagnetism)، أنه لم تطرأ أيُ تغيراتٍ لأنه لم يحدث شيءٌ ذو أهميةٍ تُذكَر منذ طبعة عام 1940. واقترح جوزيف لارمور في عام 1919 أن البُقَعَ الشمسية تتولَّد بفعلِ تأثيرِ دينامو منتظمٍ مُستمَد من الدورانِ الشمسي الذي يعمل عبرَ تغذيةٍ راجعة مع أصغرِ المجالات المغناطيسية الموجودة كي يولِّدَ مجالاً أقوى، لكن توماس كولينغ Thomas Cowling أثبَتَ في عام 1933 أن مثلَ هذه الآلية المتناظِرة مع المحور لن تفسِّرَ السلوكَ المرصود للشمس. وكان هذا هو الموقف السائد إلى أن جاءتْ أعمالُ إلساسر في عامَيْ 1946 و1947. ↑

14. يُطلَق في الفلسفة على هذا الموقف اسمُ «الموضوعية» التي تعني الإيمانَ بالحقائق دونَ أي انحيازاتٍ شخصية. يتبنَّى معظمُ العلماء هذه النظرية، في حين يُنكِر العديدُ من الفلاسفة وجودَ حقيقةٍ «منفصلة وقائمة بذاتها». ↑

15. كان تقييمُ نيوتن لأعماله أكثرَ تواضعاً، إذ قال: «يبدو أنني كنتُ أشبهَ بصبيٍّ يلعبُ على شاطئ البحر، يُسلِّي نفسَه من حينٍ لآخَر بإيجادِ حَصْوةٍ أنعمَ أو صَدَفةٍ أجملَ من المعتاد، في حين أنَّ محيطَ الحقيقة العظيم يَقبعُ أمامي بالكامل دونَ أن يَكتشفَه أحد». ↑

16. في وقتنا الحالي، تشتهر المَرْكبةُ كبلر الفضائيةُ باكتشافِ آلافِ الكواكب حول النجوم الأخرى، مع وجودِ الآلاف من أجرام كبلر المثيرة للاهتمام الإضافية التي تُعَد كواكبَ في الغالب، لكنها بحاجةٍ إلى المزيد من الفحص لاستبعادِ أيِ نتائجَ إيجابيةٍ كاذبة. أثناءَ كتابةِ هذه العبارات، انتهت المهمةُ الرئيسة للمَرْكبة كبلر بالفعل؛ إذ فقدتِ التحكُّمَ الجيروسكوبي الثلاثي المحور الكامل، لكن ثَمةَ مهمة أخرى للمَرْكبة كبلر 2 تُواصِل مَسْعاها لاكتشاف كواكب حول النجوم الأخرى. ↑

17. أثبتَت التجاربُ التي أُجرِيت على أشخاصٍ يَرْتدون نظاراتٍ مقلوبةً أنه بعدَ مُضيّ بضعةِ أيامٍ من رؤية العالَم مَقْلوباً تكيَّفَ المخُّ وأصبحوا يَرَون الجانبَ الطبيعي من العالَم مقلوباً. وعندما خلعوا النظارات، رأوا العالَمَ مقلوباً لبُرْهةٍ ولكن سرعان ما استعادوا الرؤيةَ الطبيعية. ↑

18. لأغراضٍ علمية، عادةً ما نستخدم «شبائك»، وهي قِطَعٌ زجاجية أو بلاستيكية ذاتُ خطوطٍ شديدةِ التقارُب من بعض، يصِلُ عددُها إلى مئاتِ الآلاف من الخطوط المتوازية داخلَ كلِّ بوصة. وتشتِّت الشبائكُ أيضاً الضوءَ إلى الألوانِ المكوّنة له. ويحدث هذا لأن الضوءَ الساقط على السطح ينعكسُ من فوقِ كلِّ أخدودٍ من الأخاديد ويتجمَّع على نحوٍ إمَّا بَنَّاء وإمَّا مشوَّش، اعتماداً على معدلِ التباعُد بين الأسطر في الشَبيكة، إلى الطول الموجي للضوء، الذي يبلغ الذُّرْوةَ عند زاويةٍ محددة. وبالنسبة لكل تباعُدٍ بين الأسطر في الشبيكة، تخرجُ الأطوالُ الموجية المختلفة للضوء بزوايا مختلفة. ↑

19. من الشائع استخدامُ هذه التخوم، لكنها اعتباطية. في الواقع، ليس لِطَيْفِ الأطوال الموجية حدودٌ عندَ أيٍّ من الطرفَيْن، فيما عدا القيود العملية التي تتعلَّق بالظروف - مثل قوةِ جهاز الإرسال أو حجمِ هوائيِّ جهازِ الاستقبال - التي في ظلها تتولَّد الموجات وتُرصَد. ↑

20. يُسمى نظامُ التحكم بالتوجيه، الذي لم يزل مستخدماً في صواريخ التجارب الشمسية SPARCS، وهذه الكلمة هي الحروفُ الاستهلاليةُ لعبارة Solar Pointing Aerobee Rocket Control System أو «جهاز التحكُّم بالتوجيه في الصاروخ أيروبي الشمسي». وأخيراً، مع ظهورِ أنواعٍ أخرى من الصواريخ، باتَ الحرفُ A يرمز إلى كلمة Attitude، مع الإبقاءِ على التسميةِ المختصرة كما هي، لكن مع توسيعِ نطاقِ المعنى. ↑

21. أطلَقَ الجيشُ الأمريكي أيضاً أقماراً اصطناعية شمسية لأغراضٍ بحثية (ولجمْع المعلومات الاستخباراتية)، وبخاصة سلسلة الأقمار الاصطناعية سولراد (SOLRAD) التابعة للبحرية الأمريكية. ↑

22. يُناظِر الحِزامُ المرئي تقريباً الأطوالَ الموجية التي تنبعثُ فيها أغلبيةُ الطاقة الشمسية، ومن المثير للاهتمام التمعُّنُ في أسبابِ حدوثِ هذا التناظُر. بالطبع ليست هذه مُصادَفة، ويبدو من المحتمَل أن ثَمةَ ميكروبات، ونباتات، وحيوانات تطوَّرت كي تستغلَّ الضوءَ المتاح. ولكن هذا في حد ذاته لا يفسِّر لماذا يكون غِلافُنا الجوي شفَّافاً عند هذه الأطوال الموجية.

ولعل ما حدَثَ هو أن الكائنات الحية على الأرض أثّرت كذلك على الوفرةِ النسبية لذراتِ وجُسيماتِ العناصر في الغِلاف الجوي للمساعدة في جعله يتناسب أكثرَ مع وجودها. ↑

23. هناك الآن العديدُ من وكالاتِ الفضاء التي تُطلِق أقماراً اصطناعية، أكبرُها توجد في الولايات المتحدة، وأوروبا (وكالة الفضاء الأوروبية)، وروسيا الاتحادية (وكالة الفضاء الاتحادية الروسية)، واليابان (منظمة استكشاف الفضاء اليابانية). ويُمكِنك إيجادُ القائمةِ المحدَّثةِ للأقمار الاصطناعية لوكالة ناسا، التي تشتمل على حالتها (أيْ ما إذا كانت «قيد التطوير»، أو «عاملة»، أو «سابقة») عبر الرابط: http://science.nasa.gov/heliophysics/missions. وثَمة عرْضٌ تفاعُلي لجميعِ الأقمار الاصطناعية الموجودة في المدار يُمكِنك إيجادُه عبر الرابط: http://qz.com/296941/interactive-graphic-every-active-satellite-orbiting-earth. ↑

24. من السهل، ونحن نتأمل الماضي، أن نتَّهِمَ الأشخاصَ الذين جانبهم الصواب في نقاش ما بأنهم كانوا أغبياء وبطيئي الفَهْم بلا داع. ولكنْ، ضَعْ في اعتبارك أنه في أثناءِ مُحاوَلتك معرفةَ الإجابةِ الصحيحة، أنت لا تعرفُ بعدُ مَن على صواب، وأن الجدالَ السليم أمرٌ مفيد. وهؤلاء الذين يُثِيرون الاعتراضاتِ لديهم أسبابٌ وجيهة لفعْلِ ذلك، كما أنهم يقدِّمون نوعاً من التوازُنِ من خلال الحيلولةِ دونَ اعتبارِ كل فكرةٍ جديدة (تكون غيرَ صحيحةٍ في الغالب) حقيقةً فعليةً على الفور. إن مسألةَ متى ينبغي على المرءِ الاعترافُ بأن وجهةَ النظر الجديدة صحيحةٌ والتخلِّي عن نظريةٍ قديمةٍ معقَّدة أثارتِ العديدَ من النقاشات الطويلة بين الفلاسفة. ↑

25. هذان النوعان من المشاهَدات يُسمَّيان، على الترتيب، «الاستشعار عن بُعد» و«القياس في الموقع». ↑

26. أُطلِقَت المَرْكبة المصاحِبة، فوياجر 2، قبل ذلك بستةَ عشرَ يوماً، في يوم العشرين من أغسطس، على مسارٍ مُنحَنٍ استغرقَ وقتاً أطولَ ليصلَ إلى المشتري وزحل، لكنه أتاحَ لها مُلاقاةَ كوكبَيْن آخَرَيْن هما أورانوس ونبتون. ↑

Table of Contents

- الشمس
- الشمس
- المحتويات
- المقدمة
- الفصل الأول البُقَع الشمسية
- الفصل الثاني إلقاء نظرة داخل الشمس
- الفصل الثالث نبضة شمسية
- الفصل الرابع الطيف وأسراره
- الفصل الخامس الغِلاف اللوني والشُّوَاظ الشمسي
- الفصل السادس الإكليل الشمسي المرئي
- الفصل السابع الإكليل الشمسي غير المرئي: نقاشٌ يدور في أغلبه حول الفوتونات
- الفصل الثامن عواصف من الشمس: نقاشٌ يدور في أغلبه حول الجُسيمات والمجالات
- الخاتمة: الغلاف الشمسي
- الملحق 1: الرصد الآمِن للشمس
- الملحق 2: رَصْد الشمس بالنسبة للهُواة
- الملحق 3: رَصْد الإكليل وقتَ الكسوف الشمسي
- الملحق 4: رَصْد الشمس من الفضاء
- مزيد من القراءة
- شكر وتقدير
- مصادر الصور
- الفهرس